

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

ББК 31.19
Р 35
УДК 621.31.004.18(0)

Рецензент Ю. В. Копытов

D. REAU
INDUSTRIAL ENERGY CONSERVATION
A Handbook for Engineers and Managers Second Edition
PERGAMON PRESS OXFORD, 1979

Центральная Городская
Публичная Библиотека
им. Н. А. Некрасова

712285 - 3

пр. 85

Рей Д.

Р 35 Экономия энергии в промышленности: Справочное пособие для инженерно-технических работников. Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1983. 208 с., ил. — (Экономия топлива и электроэнергии). В пер. 1 р. 40 к.

Приводятся комплекс конкретных мероприятий по реализации энергосберегающей политики в различных отраслях промышленности. Рассматриваются схемы технологических процессов, анализируются основные потери теплоты и электроэнергии и пути повышения эффективности их использования. Большое внимание уделяется утилизации сбросной теплоты.

Для инженерно-технических работников, а также для студентов энергетических институтов и техникумов.

Р 230205000-547
051(01)-83

ББК 31.19

6П2

© 1979 D. A. Reau
© Перевод на русский язык. Энергоатомиздат, 1983

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому изданию	5
Предисловие	7
Глава 1	
Первичные энергоресурсы на современном этапе	9
1.1. Уголь	9
1.2. Газ	12
1.3. Нефть	14
1.4. Ядерное топливо	17
Глава 2	
Оптимальное использование первичных двигателей	13
2.1. Использование сбросной теплоты КЭС	19
2.2. Производство электроэнергии в промышленности	20
2.3. Фреоновые паровые турбины	21
2.4. Газотурбинные установки	22
2.5. Комбинированные циклы	26
2.6. Дизельные и газовые двигатели (поршневые)	26
Глава 3	
Энергоемкие отрасли промышленности (группа 1)	33
3.1. Производство чугуна и стали	33
3.2. Производство алюминия	39
3.3. Химическая промышленность	42
3.4. Нефтеперерабатывающая промышленность	49
Глава 4	
Энергоемкие отрасли промышленности (группа 2)	52
4.1. Целлюлозно-бумажная промышленность	52
4.2. Производство стекла	59
4.3. Пищевая промышленность	64
4.4. Текстильная промышленность	71
Глава 5	
Общие вопросы экономии энергии	77
5.1. Кондиционирование воздуха	77
5.2. Автоматическое регулирование в системах кондиционирования воздуха	79
5.3. Котлы	81
5.4. Дымовые трубы	82
5.5. Системы сжигания топлива	83
5.6. Системы получения сжатого воздуха	86
5.7. Градири	87

5.8. Сушильные установки.	88
5.9. Печи	92
5.10. Основные процессы нагрева	95
5.11. Печи для сжигания отходов	95
5.12. Освещение на заводах и в административных зданиях.	96
5.13. Промышленные здания	99
5.14. Внутризаводские системы горячего водоснабжения	101
5.15. Приборы контроля за экономией энергии	101
5.16. Пароотделители	102
5.17. Резервуары для хранения горячих продуктов	103
5.18. Топливные добавки	103

Глава 6

Общие вопросы утилизации сбросной теплоты	104
6.1. Кондиционирование воздуха	104
6.2. Котлы	113
6.3. Рекуперативные горелки.	119
6.4. Утилизация теплоты в сушилках. Системы с кипящим слоем	121
6.5. Печи	129
6.6. Печи для сжигания отходов	132
6.7. Теплообменники с высокотемпературными теплоносителями	139
6.8. Методы регенерации отходов	140

Глава 7

Оборудование для утилизации сбросной теплоты	143
7.1. Теплообменники с тепловыми трубами.	143
7.2. Теплообменники с промежуточным (жидким) теплоносителем	149
7.3. Теплообменники с промежуточным (газовым) теплоносителем	152
7.4. Вращающиеся регенераторы	152
7.5. Пластинчатые теплообменники	159
7.6. Экономайзеры	163
7.7. Котлы-утилизаторы	165
7.8. Рекуператоры	169
7.9. Тепловые насосы	173
7.10. Теплообменники других типов	186

Глава 8

Аккумуляция энергии.	188
8.1. Котлы-аккумуляторы теплоты	188
8.2. Теплоизоляция	191
8.3. Среды, аккумулирующие теплоту	193
Список литературы	198

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

В промышленно-развитых странах 50—60% общего энергопотребления идет на нужды промышленности. Поэтому всемерная экономия энергии на промышленных предприятиях является одной из важнейших задач в решении топливно-энергетических проблем.

В книге обобщен накопленный зарубежный опыт по решению основных вопросов экономии и эффективного использования топлива, электроэнергии и теплоты в промышленности. По существу она составлена как справочное пособие для инженерно-технических работников, занимающихся этими вопросами. Основным достоинством книги является то, что автором рассмотрен чрезвычайно большой круг технических вопросов с описанием схем и оборудования, а также оценкой технико-экономической эффективности их применения.

Несмотря на то, что по вопросам экономии энергии в технологических процессах энергоемких отраслей промышленности в настоящее время имеется целый ряд отечественных и зарубежных книг, материалы книги, посвященные этим отраслям, несомненно представляют интерес для советского читателя, поскольку в них рассматриваются наиболее эффективные энергосберегающие технологии. В последнее время в целом ряде публикаций в СССР большое внимание уделяется проблемам экономии топлива и энергии, которые являются общими для предприятий различных отраслей промышленности и практически большую часть книги Д. Рэй посвятил именно этим вопросам.

В первую очередь это касается организационно-технических мероприятий, которые могут быть осуществлены в короткие сроки силами самих предприятий; выработки электроэнергии и теплоты собственными источниками; отопления и кондиционирования воздуха в промышленности; использования систем сжигания топлива и отходов, процессов нагрева, сушильных установок;

аккумулирования энергии и использования вторичных энергетических ресурсов. Повышение степени и эффективности использования вторичных энергетических ресурсов в настоящее время является одним из главных путей получения значительной экономии топлива и энергии в промышленности, в короткие сроки и с капиталовложениями, которые в несколько раз ниже затрат на эквивалентный прирост добычи топлива и транспортировку потребителям.

В книге рассмотрены конструктивные особенности утилизационного оборудования и основные направления использования вторичных энергоресурсов. Особое внимание уделено средствам для утилизации низкопотенциальной теплоты, избытком которой располагает практически любое предприятие. Рассматриваются схемы и оборудование, начиная от сравнительно простых регенераторов и рекуператоров, до систем с мощными тепловыми насосами, приводимыми в действие газовыми турбинами, а также стоимостная оценка их применения, включая окупаемость.

Перевод книги выполнен Т. Е. Гинзбург (гл. 2—6) и Р. Е. Злотник (гл. 1, 7, 8).

В. Е. Аракелов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Экономия энергии — это такой вопрос, интерес к которому возрастает во всех сферах общества промышленно развитых стран. Правительства стран озабочены зависимостью от импортируемых энергоресурсов, особенно от нефти, и поэтому для стран Европейского экономического сообщества типично стремление к снижению общего энергопотребления. Так, к 1985 г. энергопотребление снизится на 10% по сравнению с первоначально подсчитанным значением для этого года и до 40% уменьшится зависимость от зарубежных поставок энергоресурсов. В США на эти цели отпускаются большие средства.

Потребитель, стоящий перед лицом растущей цены на энергию, может уменьшить потери, используя некоторые виды изоляции или перейдя на более дешевое топливо, и расходовать при этом средства на новое оборудование, если оно приемлемо с финансовой точки зрения.

В этой книге рассматривается потребление энергии в промышленности. В наиболее энергоемких отраслях экономия энергии всегда рассматривалась как одно из необходимых условий создания производственных технологий. Однако сегодня актуальность экономии энергии возросла, так как основной составляющей расходов фирм наиболее энергоемких отраслей промышленности стали затраты на энергоресурсы.

Имеется много возможностей использования в одной из отраслей промышленности тех методов экономии энергии, которые применяются в другой отрасли: основная цель этой книги — определить эти возможности. В книге собрано много данных по методам экономии энергии и стоимости их внедрения; целью данной книги является также представление этих данных в таком виде, в каком они могли бы заинтересовать руководителей в области энергетики.

Необоснованно считать эту книгу руководством по экономии энергии в промышленности, это — справочное пособие для специалистов, занимающихся экономией энергоресурсов.

В книге нет ответов на все вопросы, но если она сможет подвести читателя к правильным вопросам или дать на них ответ, одна из моих задач будет выполнена.

* * *

При работе над данной книгой я старался снабдить читателя как можно большим количеством данных по экономии энергии.

С момента первой публикации этой книги стала очевидной поддержка и внимание правительства к экономии энергии в промышленности, и не только в Великобритании. Использование теплоутилизационного оборудования, типы которого описаны в этой книге, может дать немедленную и существенную экономию во многих отраслях промышленности. В течение следующих 2—3 лет будет опубликовано много материалов, касающихся практического использования теплоутилизационных систем, что будет использовано при подготовке будущих изданий.

Я надеюсь, что данное издание с имеющейся в нем дополнительной информацией будет полезно всем, кто занимается вопросами экономии энергоресурсов.

Д. Рей

Выверено

стр 9-24

Всрвара
стр 9-24

но использовать сбросную теплоту. Таким образом, промышленная газовая турбина должна быть частью общенергетической системы, именно там, где цена на топливо очень высока. В данном случае под промышленными газовыми турбинами понимаются и модифицированные авиационные двигатели. Как указывается производителями промышленного оборудования, более регулярный ремонт требуется для станков именно с этими двигателями.

Газовая турбина Ruston, сконструированная специально для промышленных целей, работает 20—30 тыс. ч в промежутке между осмотром лопаток и 80—100 тыс. ч между капитальными ремонтами.

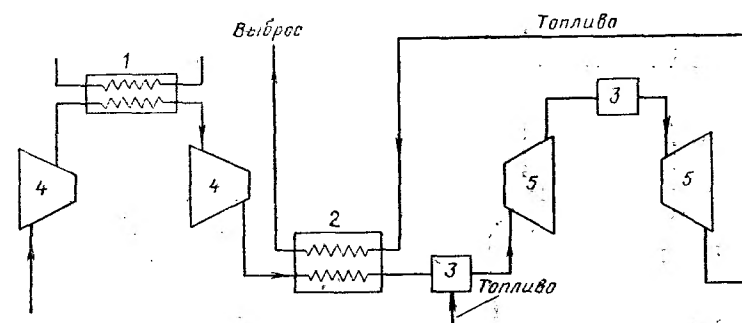


Рис. 2.6. Газотурбинная установка с промежуточным охладителем и вторичным нагревом:

1 — промежуточный охладитель; 2 — регенератор; 3 — камера сгорания; 4 — компрессор; 5 — газовая турбина

Можно отметить следующие области ее промышленного использования наряду с выработкой электроэнергии [2.5]:

процессы сушки (в результате непосредственного использования теплоты сбросных газов);

выработка пара в котле-утилизаторе для технологических целей, в том числе дистилляционных установок и систем кондиционирования воздуха;

нагрев воды, в том числе для дистилляции подогрева химикатов, нефти и нефтепродуктов;

нагрев воздуха, в том числе для обработки пищевых продуктов и для целей отопления.

Эффективность применения газотурбинной установки можно рассмотреть на примере нефтеперерабатывающего завода фирмы Standard Oil [2.6]. На заводе работала мощная печь с высоким КПД. Однако общий КПД печи и электростанции при отдельной схеме энергоснабжения относительно низкий.

Более экономичная схема применена этой фирмой на заводе в 1975 г. Несмотря на то что печь уже была установлена, вблизи нее была смонтирована газотурбинная установка, так что связь между двумя агрегатами обеспечивалась коротким газопроводом. (Именно в этом и состоит преимущество газовой турбины, которая почти не требует вспомогательного оборудования.) По этой схеме сбросные

газы газовой турбины непосредственно используются в зоне горения печи.

Такая схема с газовой турбиной позволила увеличить КПД цикла с 71 до 79%.

2.5. Комбинированные циклы

Комбинированный цикл приводится на рис. 2.7. Впервые он начал функционировать в ФРГ в 1973 г. [2.9]. Он имел КПД 39,8% при использовании в качестве топлива газа коксовой печи и 42% при использовании природного газа. Эта установка имела мощность netto приблизительно 35 МВт и была предназначена преимущественно для выработки электроэнергии.

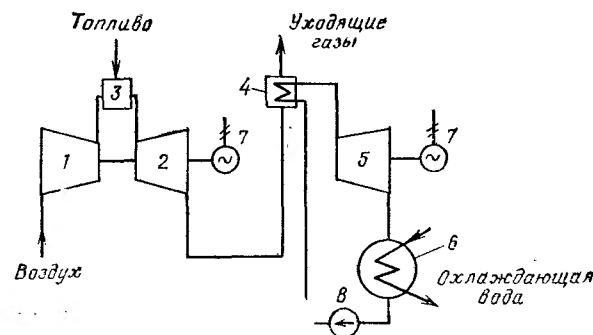


Рис. 2.7. Комбинированный парогазовый цикл:

1 — компрессор; 2 — газовая турбина; 3 — камера сгорания; 4 — котел-утилизатор; 5 — паровая турбина; 6 — конденсатор; 7 — генератор; 8 — питательный насос

Комбинированный цикл в сравнении с паротурбинным кроме повышения КПД имеет следующие преимущества:

- более быстрый пуск. Полная нагрузка достигается за 30 мин;
- снижение расхода охлаждающей воды. По сравнению с классической паровой турбиной расход охлаждающей воды составляет только около 33%;

- снижение выбросов в атмосферу;

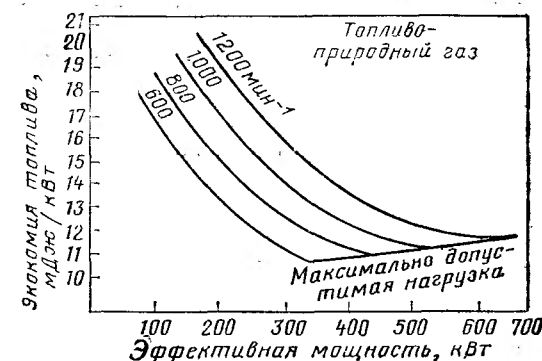
- снижение капитальных затрат на 1 кВт — менее 100 ф. ст./кВт.

Кроме того, установки, работающие по комбинированному циклу, гибки в эксплуатации при изменении потребности в теплоте и электроэнергии.

2.6. Дизельные и газовые двигатели (поршневые)

В тех случаях, когда больше нужна механическая работа, поршневые двигатели имеют ряд преимуществ по сравнению с газовой турбиной. Обычно КПД их выше, чем у турбины, и составляет 30—35%; кроме того, они дешевле (хотя в настоящее время имеется тенденция к уравниванию стоимости поршневых двигателей и га-

Рис. 2.8. Влияние числа оборотов на экономию топлива при изменении эффективной мощности двигателя, работающего на природном газе



зовых турбин). Однако вспомогательные системы, необходимые для поршневых двигателей, например системы охлаждения, приводят к значительному расходу энергии. Эти агрегаты имеют более низкое отношение мощности к весу, а их сбросные газы при неудовлетворительной эксплуатации могут быть источником значительного загрязнения атмосферы.

Имеется два типа поршневых двигателей, работающих на двух видах топлив с искровым зажиганием. Два вида топлива используется для двигателей, которые работают в дизельном цикле, при этом для зажигания применяется дизельное топливо, а основным топливом служит природный газ. Это позволяет одновременно сжигать распыленное жидкое топливо и газ, и двигатель имеет такие же характеристики, как и двигатели, работающие на чистом природном газе. В тех случаях, когда нет природного газа, двигатель этого типа может без отключения немедленно переключаться на 100%-ное дизельное топливо. Расход дизельного топлива в данном двигателе составляет приблизительно 5—10% суммарного.

Двигатели с искровым зажиганием в прошлом в Великобритании использовались редко. Ограничением в их использовании являлась цена на газ с его высоким содержанием водорода. Поэтому крупные двигатели с искровым зажиганием в основном производились в Центральной Европе и в США, а в Великобритании применялись двигатели, работающие на двойном топливе. Использование природного газа в качестве топлива имеет ряд преимуществ. Он не дает углеродистого осадка, и поэтому исключается необходимость частых ремонтов двигателя. Кроме того, не происходит разжижения масла, и поэтому срок службы смазки значительно увеличивается. Так как основным компонентом природного газа является метан, который обладает высокой стойкостью к детонации, то в двигателях с искровым зажиганием достигают степени сжатия 12:1, что ведет к повышению его КПД. Легко сделать входящую в двигатель смесь топливо—воздух однородной, и, таким образом, холодный запуск возможен без обогащения. Кроме того, улучшенный состав смеси топливо—воздух повышает экономичность и снижает уровень токсичности выхлопного газа.

Чтобы увеличить мощность двигателей, обычно используют турбокомпрессор. Мощность двигателя с высокой степенью сжатия

(10,5 : 1), на 35% выше, чем двигателя с низкой степенью сжатия без наддува (7,5 : 1), при том же самом рабочем объеме. Тем не менее из-за необходимости применения более крупных подшипников и коленчатых валов и усложнения конструкции охлаждающей рубашки первоначальная цена за киловатт для двигателя с турбокомпрессором может достигать цены за киловатт для двигателя без наддува при одинаковой производительности.

Ниже приводятся типовые мощности газовых первичных двигателей, а на рис. 2.8 [2.11] — влияние числа оборотов на экономию топлива при изменении эффективной мощности двигателя, работающего на природном газе.

Тип	Мощность, МВт
<i>Газовые промышленные турбины</i>	
Centrax	0,5—0,7
Ruston	1,1—3,7
John Brown	3—54
GEC-English Electric	6—60
Rolls Royce	13—20
<i>Газовые турбины газогенераторных установок</i>	
Rolls Royce	13—25
Waukesha	0,33
Kongsberg	1,2—1,4
Solar	0,06—2,6
Avco Lucoming	0,75—3
Suizer	3—20
<i>Поршневые двигатели, использующие двойное топливо</i>	
W. H. Allen	0,24—2,3
English Electric	0,6—2,6
Mirrlees	0,75—5
Ruston	1—3,5
<i>Поршневые двигатели с искровым зажиганием</i>	
GES Diesels	0,04—0,2
Cummings	0,14—0,3
Caterpillar	0,1—0,7
Waukesha	0,1—1,4
White—Superior	0,1—1,55

Как утверждают производители специальных двигателей, работающих на природном газе и предназначенных для промышленных целей, классический автомобильный двигатель рассчитан на относительно короткий срок службы, он менее надежен и поэтому требует значительных затрат на ремонт. Однако стоимость модернизированного дизельного двигателя Форда, применяемого для привода компрессора и использующего в качестве топлива природный газ, менее 35% стоимости аналогичного газового двигателя. Характеристики некоторых из автомобильных двигателей при переходе их на природный газ приводятся в табл. 2.1, а подробная характеристика модернизированного двигателя Форда — на рис. 2.9.

Модернизация двигателей требует наличия нового карбюратора. Такие карбюраторы поставляет американская фирма Impco.

Рис. 2.9. Рабочие характеристики автомобильного двигателя, переведенного на природный газ

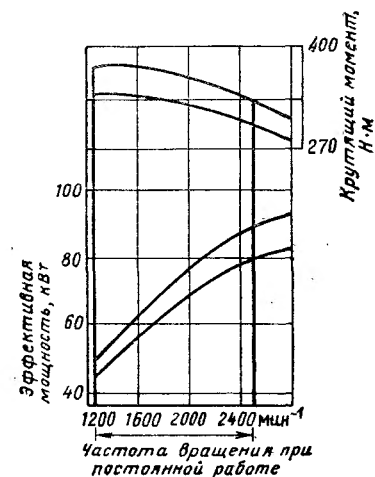
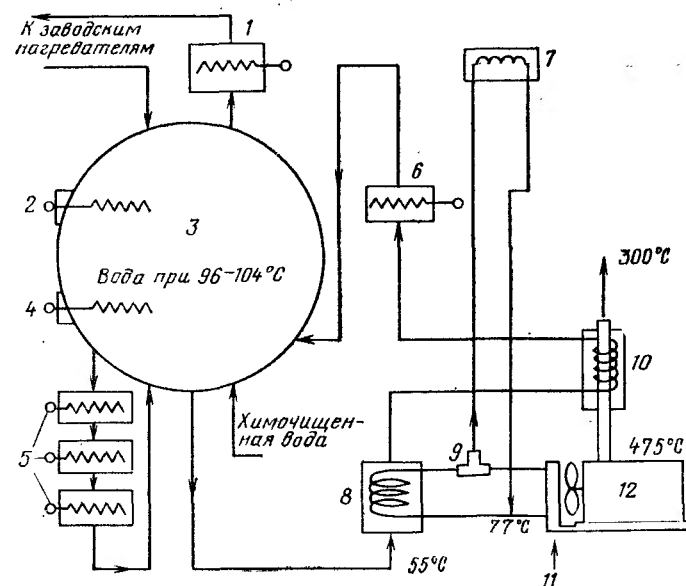


Рис. 2.10. Дизельная установка с комбинированной утилизационной системой:

1 — дополнительный подогреватель 250 кВт; 2 — погружной подогреватель 250 кВт; 3 — резервуар для аккумуляции теплоты; 4 — ночной нагреватель 30 кВт; 5 — измерители нагрузки; 6 — нагреватель 250 кВт; 7 — внешний радиатор; 8 — теплообменник с водяной рубашкой; 9 — регулирующий клапан; 10 — утилизатор теплоты выхлопных газов; 11 — радиатор; 12 — двигатель мощностью 400 кВт



Утилизация сбросной теплоты поршневых двигателей. Удельное количество теплоты, утилизируемой от водяной рубашки охлаждения и сбросных газов, для различных типов двигателей [2.12] приводится в табл. 2.2.

Дизельная установка с комбинированной утилизационной системой для использования сбросной теплоты водяного охлаждения и отработанных газов, работающая на заводе фирмы Petbow в Великобритании, приводится на рис. 2.10 [2.14]. Здесь применяются дизельные

Т а б л и ц а 2.1. Характеристики автомобильного двигателя при переводе его на природный газ [2.13]

Двигатель	Рабочий объем см ³	Число цилиндров	Максимальная частота вращения мин ⁻¹	Мощность на природном газе, кВт, при частоте вращения, мин ⁻¹		
				1500	1800	максимальная
Perkins3152*	2500	3	2400	23	26	29
Perkins4203*	3340	4		30	36	40
Perkins4236*	3860	4		37	42	49
Ford2503E*	2590	3	2100	20	25	28
Ford2511E*	3294	3		28	32	35
Ford2513E*	4196	4		35	40	47
Rolls RoyceB61*	4880	6	3000	46	57	89
Rolls RoyceB81*	6560	8		61	74	119
Ford2261E**	1100	4		7.5	9	16
Ford2264E**	1600	4		11	14	28
Ford2602E**	2000	4*		17	22	37
Ford2614E**	3000	6*		25	29	52
Ford2711ES.1.4***	4150	4	2250	33	40	49
Ford2715ES.1.6***	6220	6		51	62	74

* Применяются для тракторов, автопогрузчиков и т. д.

** Автомобильные двигатели, редко применяемые для стационарных установок.

*** Модернизированные дизельные двигатели, предназначенные первоначально для работы на сжиженном газе.

** V-образные цилиндры.

Т а б л и ц а 2.2. Удельные расходы топлива и теплоты, утилизируемой от двигателей различного типа

Тип двигателя	Удельный расход топлива при номинальной нагрузке, кДж/(кВт·ч)	Удельное количество теплоты, утилизируемой при номинальной нагрузке, кДж/(кВт·ч)		
		Водяная рубашка при коллекторе, охлаждаемом		Утилизационная установка
		воздухом	водой	
Двухтактный механический газовый двигатель с наддувом	11 700	2470	3140	1715
Газовый двигатель без наддува	17 150	45 600	54 500	2130
Дизельный двигатель с воздухоподогревом	11 700	2340	2760	1550
Четырехтактный газовый двигатель без наддува	12 160	2720	3300	1755
Дизельный двигатель без наддува	12 100	2720	3300	1755
Дизельный двигатель с генератором	10 000	1550	1920	1715
Дизельный двигатель двойного топлива с генератором	9200	1340	1550	1420
Газовая турбина без регенерации	25 850	—	—	18 000
С регенерацией	18 400	—	—	10 450

Примечание. Давление пара 100 кПа, температура окружающего воздуха 38 °С.

двигатели фирмы Rolls Royce мощностью 500 кВт, причем один из трех всегда является резервным.

Аккумулярующий резервуар рассчитан на 95 м³. Вода поддерживается почти при температуре кипения и насосом подается в заводское здание в специальные нагревательные установки, расположенные в каждом пролете на уровне крыши для нагрева воздуха. Используются погружной нагреватель на 30 кВт для поддержания номинальной температуры воды в резервуаре в течение ночи, дополнительный погружной нагреватель на 250 кВт для обеспечения быстрого нагрева рано утром и внешний радиатор для сброса теплоты в особенно жаркое время.

Общая стоимость системы 200 тыс. ф. ст. Дизельные двигатели будут использоваться для выработки электроэнергии в тех случаях, когда на заводе появятся возможности использования сбросной теплоты этих двигателей для целей теплоснабжения. При этом экономично осуществлять выработку электроэнергии этими двигателями в течение дня и только 8 мес в году, а ночью и летом использовать электроэнергию от энергосистемы.

Имеется много других сфер использования сбросной теплоты. Кроме выработки электроэнергии поршневые двигатели могут использоваться в системах кондиционирования воздуха и получения холода; газотурбинный двигатель может служить приводом холодильных установок, при этом при изменении нагрузки легко осуществляется регулирование. Еще одна область применения — привод для центробежных компрессоров. При этом установлено, что по стоимости и эксплуатационным расходам оптимальным является двигатель с частотой вращения 900 мин⁻¹.

Одна из наиболее интересных областей применения дизельного газового двигателя — привод теплонасосного компрессора. В этом случае возможность использовать сбросную теплоту делает эту систему в сравнении с электрической гораздо более эффективной с точки зрения расхода энергии, о чем подробно будет излагаться в гл. 7. Другие области применения приводятся в [2.12, 2.15, 2.16].

Ремонт и надежность. В США все больше заключается контрактов на гарантийный ремонт и обслуживание. Контракты на ремонт варьируются от контрактов на полный ремонт и обслуживания, включающих поставку запасных деталей и рабочей силы, до контрактов, по которым производится только ремонт двигателя.

Полные эксплуатационные расходы состоят из трех основных составляющих:

расходов на различный ремонт и обслуживание, включая рекомендации по обслуживанию плюс подготовка топлива;

расходов на капитальный ремонт, обычно выражаемых как цена за час работы двигателя. Сюда входит вся работа и все обязанности, необходимые для выполнения крупного и мелкого капитального ремонта в рекомендуемые интервалы;

стоимости рабочей силы, необходимой для выполнения ремонта и обслуживания.

Таблица 2.3. Расходы на утилизацию теплоты при использовании двигателей мощностью 1—2 МВт

Расходы	Класс А/В	Класс F	Класс G	Двойное топливо
Капитальные затраты, ф. ст/кВт, на:				
электронно-механическое оборудование	110—124	120—170	150—190	120—180
распределительное устройство и кабели	12—20	12—20	12—20	12—20
монтаж и строительство холодильной системы	20	20	20	20
Всего*	142—164 (153)	—	182—230 (206)	152—220 (186)
Постоянные годовые расходы на страховку, процент с капитала и амортизацию установки 1,5 МВт, ф. ст/кВт (в среднем)	1,5304	1,8107	2,0608	1,8607
Удельные эксплуатационные расходы, пенс/(кВт·ч):				
топливо	1,292	1,004	0,850	1,100
смазочное масло	0,050	0,053	0,056	0,050
запчасти и рабочая сила	0,027	0,033	0,036	0,023
персонал	0,067	0,133	0,200	0,067
Всего	1,436	1,223	1,142	1,240
Удельная капитализация, пенс/(кВт·ч):				
50% использования (4380 ч)	0,349	0,413	0,471	0,425
10% использования (876 ч)	1,747	—	—	—
Удельные расходы на выработку электроэнергии (брутто), пенс/(кВт·ч)	3,183	1,636	1,613	1,665
Удельные расходы на утилизацию сбросной теплоты, пенс/(кВт·ч)	0,950	0,950	0,950	0,950
Удельные расходы на выработку электроэнергии (нетто), пенс/(кВт·ч)	2,233	0,686	0,663	0,715

* В скобках — в среднем.

Примечание. Характеристики топлива:

Класс А/В	Стоимость, пенс/МДж	Частота вращения двигателя, мин ⁻¹
Класс F	12,65·10 ⁻²	750
Класс G	10,75·10 ⁻²	750—600
Двойное топливо	9,05·10 ⁻²	600—500
	10,4·10 ⁻²	750—600

Первая и вторая составляющие расходов могут изменяться в больших пределах в зависимости от сложности и назначения двигателя, а третья зависит от стоимости рабочей силы и размещения установки с учетом расстояния от пункта отправления обслуживающего персонала.

Расходы для поршневых двигателей мощностью от 1 до 2 МВт приводятся в табл. 2.3. Это — данные [2. 17] для поршневых двигателей, работающих на газойле (класс А/В), на нефтяных остатках (классы F, G), и природном газе (в системах с двойным топливом); значения удельных расходов на утилизацию сбросной теплоты приняты равными 0,45 пенс/(кВт·ч) для сбросной теплоты и 0,95 пенс/(кВт·ч) для всей утилизированной теплоты (включая теплоту, утилизируемую от водяной рубашки).

Глава 3

ЭНЕРГОЕМКИЕ ОТРАСЛИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ (ГРУППА 1)

Энергопотребление в промышленности Великобритании составляет приблизительно 40% общего энергопотребления в стране, в Нидерландах — от 35 до 40%, а в США — около 40%. В промышленно развитых странах на долю металлургической промышленности, в особенности на производство чугуна и стали, а также на химическую и нефтеперерабатывающую отрасли промышленности приходится самая высокая доля энергопотребления. Именно поэтому эти отрасли привлекают наибольшее внимание с точки зрения экономии энергии.

3.1. Производство чугуна и стали

Производство чугуна и стали является наиболее энергоемкой отраслью промышленности как в Великобритании, так и в США. И в большинстве других промышленно развитых стран потребление энергии в этой отрасли значительно выше, чем в остальных. Если в настоящее время потребление энергии в мировом производстве чугуна и стали очень высоко (например, в 1970 г. в мире на производство стали расходовалось 750 млн. т угля, или 11% мирового энергопотребления [3,31, причем 60% — в виде коксующегося угля), то в будущем потребность в энергии для производства стали будет еще выше.

Сталь будет играть важную роль в создании оборудования для использования существующих и будущих источников энергии. Только в США для обеспечения прогнозируемого роста строительства АЭС до 2000 г. потребуется около 2 млн. т высококачественной нержавеющей стали. Создание оборудования для угольной промышленности и использование геотермальной энергии в США также потребуют огромного количества этого материала. Сегодня, когда во всем мире прокладывают трубопроводы для нефти и газа общей протяженностью около 160 тыс. км и имеется настоятельная необходимость в транспортировке нефти, газа и угля к промышленным центрам, понятно, как велика потребность в стали.

Таблица 3.1. Изменение структуры потребления энергоресурсов в производстве стали в Великобритании, %*

Энергоресурсы	1955 г.	1960 г.	1965 г.	1972 г.
Коксовый уголь и продукты	61	63	57	52
Некоксуемый уголь	23	12	6	0
Жидкое топливо	7	13	22	25
Электроэнергия **	7	10	13	16
Газ (городской и природный)	2	2	2	7
Всего	100	100	100	100

* Процент общего энергопотребления в промышленности.

** Вычислено с учетом расходов топлива на выработку электроэнергии при КПД=28%.
Уголь — основное топливо для выработки электроэнергии.

Энергоиспользование при производстве стали. За последние пять лет произошло увеличение эффективности энергоиспользования в этой отрасли за счет ряда усовершенствований в технологических процессах, в том числе введения в практику кислородных конверторов и непрерывного литья заготовок и использования более качественной импортируемой руды.

В табл. 3.1 приводятся данные по изменению структуры потребления энергоресурсов и стремительному росту использования в качестве топлива нефти и газа. Было бы хорошо, однако, если бы эта тенденция носила обратный характер, до тех пор пока не появятся атомные станции, которые будут давать высокотемпературную теплоту для производства стали.

При производстве чугуна и стали можно выделить четыре основные энергоемкие стадии: добычу и подготовку руды, производство передельного чугуна, производство стали и процессы ее обработки (рис. 3.1). Производству передельного чугуна предшествует производство кокса при эффективности термоконверсии в коксовой печи около 85%, а также подготовка агломерата — смеси кокса, железной руды и известняка, который затем обжигается и вводится в доменную печь. Новейшая доменная печь представляет собой очень крупный агрегат, основной частью которого является стальной цилиндр с огнеупорной футеровкой высотой, как правило, 30 м с подом диаметром 10 м. Руда, агломерат, кокс и известняк подаются сверху в доменную печь, а воздух поступает через фурмы. Печи работают при температуре свыше 1100°С и выдают расплавленный чугун и шлак. Около 35% энергии, используемой для получения всей углеродистой стали, потребляется доменной печью. Передельный чугун, полученный в доменной печи, поступает затем в сталеплавильную печь. В мартеновских печах обычно за 5—8 ч получают 250 т стали, но эта производительность с учетом совершенствования процесса за счет использования кислорода и прочих мероприятий весьма мала по сравнению с производительностью кислородных конверторов, которые внедрены на многих предприятиях. В них примерно за 40 мин можно получить 350 т стали. Исходя из этого расход энергии на производство 1 т стали в конвертерах составляет всего 30% по сравнению с расходом энергии в мартеновской печи.

Единственным недостатком кислородных конвертеров является использование в них меньшего в сравнении с мартеновской печью количества стального скрапа,

Третьим типом сталеплавильной печи является электродуговая печь. Первоначально она использовалась главным образом для производства специальных сталей; в настоящее время эксплуатируются печи производительностью 300 т, в которых может перерабатываться до 100% твердого металлического лома. С точки зрения потребления энергии электродуговые печи менее экономичны, чем печи других типов, однако они имеют определенные преимущества, связанные с использованием электроэнергии подобно другим установкам, что будет рассмотрено в следующих главах.

Слитки, образованные при охлаждении расплавленной стали и выходящие из печи в виде отливок, затем подвергаются прокатке и обработке, при которой используется большое количество электроэнергии. На этих стадиях можно экономить около 15% энергии, внедрив технику непрерывного литья. При этом исключается необходимость производства стальных слитков, поскольку расплавленная сталь непосредственно подается в охлаждаемый кристаллизатор для получения слабов и других заготовок для проката.

Экономия энергии при производстве чугуна и стали. Имеется много путей снижения энергопотребления в производстве чугуна и стали, и часть из них уже используется в Великобритании, США, Японии и других странах. Одним из очевидных путей является использование там, где это возможно, высококачественной руды. Но в данной главе будут рассмотрены методы повышения эффективности энергоиспользования за счет совершенствования технологии процессов.

В Японии, где в основном используется импортируемый коксующийся уголь [3.3], снижение нормы потребления кокса в доменной печи достигается путем различных мероприятий. К ним относятся:

- улучшение свойств шихты доменной печи и увеличение в агломерате доли окатышей;
- увеличение температуры и давления в домне;
- улучшение качества кокса;
- введение дополнительного топлива в фурмы;
- улучшение контроля за загрузкой и технологическим процессом в доменной печи.

В результате в Японии норма потребления кокса в доменной печи составляет в среднем 340—350, в США — 470, в Великобритании — 500 кг/т (в 1952 г. эта цифра для Великобритании была 1000 кг/т). Более низкому использованию кокса в печах в Японии, правда, можно противопоставить более высокую норму потребления топлива — 430 кг/т в сравнении с 28 кг/т в Великобритании. Экономия кокса в США не имеет такого большого значения, как в других странах, из-за его относительно низкой цены. Такое же положение в Нидерландах за последние 25 лет привело к снижению потребления кокса с 850 до 430 кг/т [3.6].

В Великобритании мероприятия по экономии связаны с повышением единичной производительности доменных печей, которая достигает 8 тыс. т передельного чугуна в сутки, улучшением огнеупорной футеровки и увеличением интервала между ремонтными работами. Именно в этом случае очень важен контроль за технологическим процессом. Использование вычислительной техники и контрольно-измерительных приборов, имеющих более высокий класс точности, позволяет обеспечить оптимальный режим работы печи.

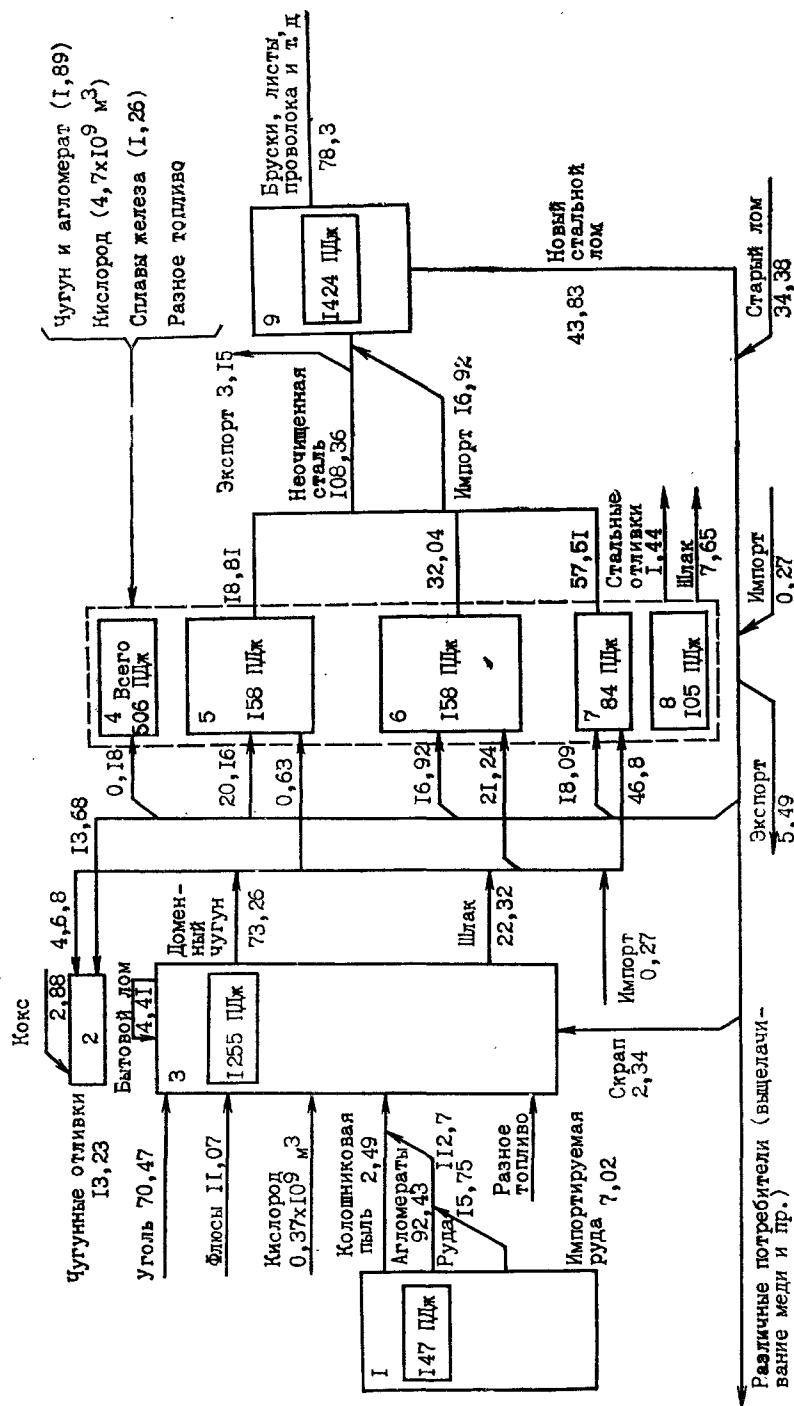


Рис. 3.1. Потребление энергии в производстве чугуна и стали в США в 70-х годах:

1 — добыча руды и подготовка руды к шлаку (8% — комплекс доменной печи и коксовой печи и др.); 2 — комплекс доменной печи и коксовой печи (62% — восстановление руды; 31% — потери в доменной печи; 5% — потери в производстве кокса, 2% — флюс, кислород, топливо и др.); 3 — флюс, кислород, топливо и др.; 4 — сталеделательные печи; 5 — электрические печи (78% — электроэнергия; 15% — известь; 7% — кислород и электроэнергия); 6 — мартеновские печи (80% — топливо; 20% — пар, кислород и электроэнергия); 7 — кислородный конвертер; 8 — печи для литья стали и пр.; 9 — печи для обработки стали (39% — нагрев и отжиг; 37% — электролиз; 14% — разливочное топливо и кислород; 10% — электроэнергия).

Одним из методов экономии энергии в доменном процессе является применение газовых турбин для утилизации энергии избыточного давления газа доменной печи. Газовая турбина, установленная за доменной печью в Японии в 1974 г., имеет мощность 6,5 МВт, при этом количество утилизированной энергии составляет 80—84%. Постоянная нагрузка на турбине при колебаниях давления в печи обеспечивается применением байпасной системы. Предполагаемая мощность турбины составляет 5 МВт для печи с диаметром распара 8 м и до 20 МВт с диаметром 14 м. По расчетам, проведенным в Нидерландах, период окупаемости таких утилизационных газовых турбин составляет 7 лет [3.6].

В настоящее время рассматриваются также вопросы, связанные с отказом от использования кокса и угля в доменных печах и в металлургической промышленности вообще. В научных кругах ФРГ раздается критика в адрес такой тенденции [3.7] в связи с возможным будущим дефицитом на природный газ и возросшей ценой на нефть и приводятся доводы в пользу создания металлургических производств, работающих исключительно на угле и угольных продуктах, а именно на коксе и газе коксовой печи. Очевидно, что необходимым условием для этого является возможность использования газа доменной печи для косовой печи. Если учесть, что в США и Западной Европе имеются резервы запасов угля, то понятно преимущество такой точки зрения для будущего. В США рассмотрены новая технология с использованием угля, а также применения технологических процессов коксования для широкого использования коксующегося угля, что весьма перспективно [3.8].

Использование кислородных конвертеров и электродуговых печей для производства стали гораздо дешевле использования мартеновских печей, а эксплуатационные расходы на кислородные конвертеры настолько невелики, что этот тип оборудования должен применяться повсеместно. В Великобритании большое значение приобретают электродуговые печи, поскольку в них может использоваться предварительный нагретый скрап.

В этих агрегатах, так же как и в существующих мартеновских печах, имеются возможности утилизации сбросной теплоты. На современном металлургическом предприятии около 40% общего количества используемой энергии теряется в виде высокотемпературных газов, 15% — в виде низкотемпературного пара и горячей воды и 10% — с излучением. Если эту теплоту, особенно газы с высокой температурой, утилизировать и вторично использовать непосредственно на предприятии или за его пределами, то можно получить существенную экономию топлива.

Фирма British Steel Corporation именно для этой цели в течение ряда лет разрабатывала керамические высокотемпературные рекуператоры и регенераторы [3.9, 3.10]. Керамический рекуператор, который может подогревать воздух для горения до температуры 650 °С, приводится на рис. 3.2. Его возможности значительно выше в сравнении с металлическими рекуператорами, в особенности с точки зрения ограничений по рабочим температурам. Проблемы, связанные

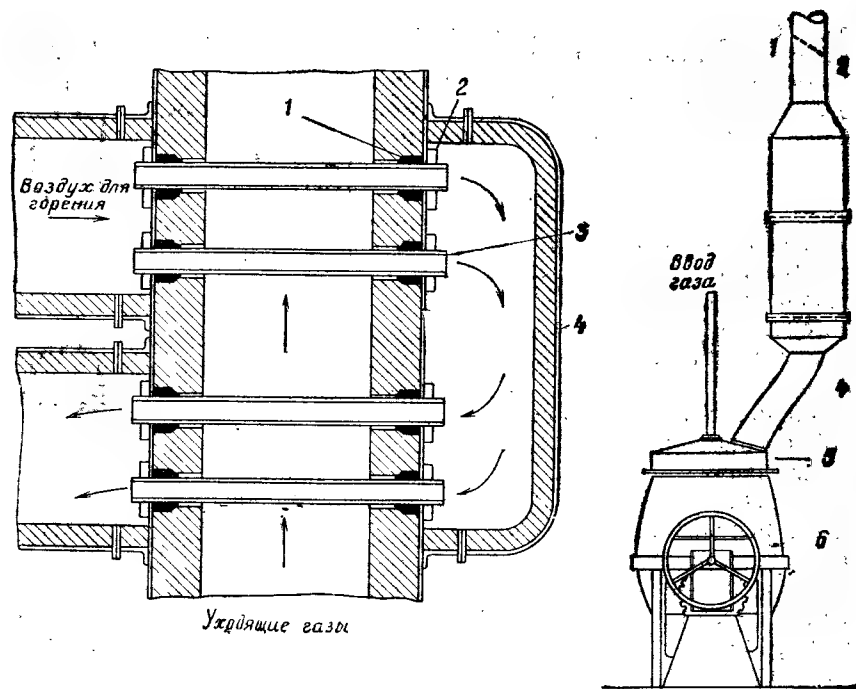


Рис. 3.2. Керамический рекуператор фирмы British Steel Corporation:

1 — упругое уплотнение; 2 — пластина для крепления прокладки; 3 — керамическая труба; 4 — коллектор

Рис. 3.3. Система подогрева скрапа, разработанная в США:

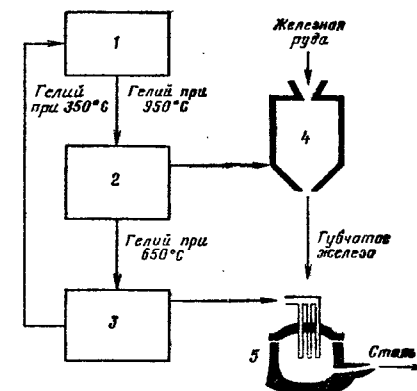
1 — заслонка; 2 — труба; 3 — подогреватель скрапа; 4 — изолированная труба; 5 — колпак; 6 — кислородный конвертер

с герметизацией, также минимальны при использовании эластичных керамических уплотнений. Эта же фирма занимается разработкой вращающихся регенераторов, которые позволяют увеличить температуру подогрева до 1000 °C [3.11]. Утилизируя теплоту уходящих газов кислородных конвертеров и используя ее для подогрева металлического скрапа в конвертерном производстве [3.12]. Исследования, проведенные на опытной установке в США, показали, что при прохождении их через неподвижный слой размельченного скрапа использование его увеличивалось на 43%. Доля утилизированной теплоты при таком методе подогрева составляла 44% всей энергии, необходимой для расплава скрапа. Применявшаяся система приводится на рис. 3.3. Количество используемого скрапа варьировалось между 20—40% общей загрузки печи (200 кг). Такая же работа проводилась по электродуговым печам [3.13]; подобные предложения рассматривались также и в Великобритании [3.14].

Непрерывное литье заготовок представляет наибольший интерес, но при замене существующей техники литья непрерывной требуются высокие капиталовложения, что, естественно, ограничивает темпы внед-

Рис. 3.4. Схема использования ядерной энергии в производстве стали:

1 — высокотемпературный ядерный реактор с газовым охлаждением; 2 — установка для получения восстановительного газа; 3 — электростанция; 4 — восстановительная печь; 5 — электродуговая печь



рения этого экономичного процесса. Будущее здесь связано с использованием больших количеств низкопотенциальной теплоты, выделяющейся в кристаллизаторах. Непрерывное поступление низкопотенциальной теплоты является реальной предпосылкой ее вторичного использования.

В перспективе технологический процесс производства стали связан с использованием ядерной энергии, преобразованной в электроэнергию или высокотемпературную теплоту. Для полной эффективности железная руда должна восстанавливаться с применением газа, а не расплавляться в доменной печи. Однако имеются трудности в балансировании потребности в выработке теплоты и электроэнергии в реакторном комплексе. Ряд опытов проводился, главным образом, с высокотемпературным реактором, где в качестве охладителя использовался гелий, но применение такого реактора возможно не ранее 1990 г. Одна из возможных схем, в основе которой лежит система с высокотемпературным реактором, приводится на рис. 3.4.

3.2. Производство алюминия

Производство первичного алюминия осуществляется в три стадии:

- добыча боксита;
- очистка боксита для экстракции оксида алюминия;
- восстановление оксида алюминия до получения первичного алюминия.

К другим стадиям относятся прокат и экструзия до получения алюминиевых листов, прокатного профиля и труб.

На добычу используется меньшее количество энергии, чем на все остальные стадии. Значительное количество топлива потребляется в процессе, применяемом для получения оксида алюминия из боксита фирмой Bayer. Сначала бокситная руда вываривается в каустической соде, в результате чего образуется гидрат алюминия, который затем превращается в безводный оксид алюминия обжигом при температуре 1200 °C. На стадии обжига потребляется приблизительно 22,3 ГДж/т оксида алюминия (4 т боксита дают 1 т алюминия). Оксид алюминия восстанавливается по технологии фирмы Hall—Heroult, основой которой является электролиз.

Таблица 3.2. Затраты энергии на производство алюминия, ГДж/т*

Стадии производства	Электро- энергия, нетто	Расход топлива на выра- ботку электро- энергии**	Теплота топлива (газ, ожи- женный газ или жидкое топливо)	Энергия, всего	Всего кумуля- тивной энергии
Добыча боксита	0,02	0,05	1,0	1,1	4,4
Получение оксида алюминия на установке фирмы Bayer	1,1	2,8	18,4	22,3	49,0
Производство анодов	—	—	20,9	20,9	69,9
Восстановление оксида алюми- ния до получения первично- го алюминия	64,8	166,6	13,7	245,1	315,0
Прокат на прокатном стане:					
А	5,5	14,1	16,8	36,4	—
Б	7,2	18,7	31,3	57,3	—
Экструзия на установке для экструзии:					
А	4,7	12,1	17,7	34,5	—
Б	8,3	21,3	9,0	38,6	—
В	5,9	15,1	21,6	42,6	—

* Затраты на 1 т продукта на каждой стадии

** КПД получения электроэнергии принимался равным 28%, хотя на некоторых алюми-
ниевых заводах можно получить более высокую цифру при использовании собственных
источников энергии [3.5].

Как видно из табл. 3.2, на этой стадии потребляется большое количество электроэнергии.

Электролитический процесс, используемый фирмой Hall—Hergoult, за последние 20 лет значительно усовершенствовался, и потребление электроэнергии на 1 т алюминия снизилось почти на 35%. Примерный энергобаланс процесса электролиза приводится в табл. 3.3 [3.4].

Значительные потери теплоты, составляющие почти половину общего энергопотребления, имеют место прежде всего из-за большого межэлектродного расстояния (5—6 см). Утилизация этой теплоты на заводе вполне возможна, однако она невыгодна из-за высоких капи-

Таблица 3.3. Энергобаланс процесса электролиза

Приход энергии, ГДж/т		Расход энергии, ГДж/т	
Электроэнергия	54,0	Теплота реакции на восстанов- ление Al_2O_3	32,4
Теплота реакции	13,0	Теплота, аккумулированная установкой	3,3
Теплота вторичного окисления алюминия	1,8	Теплота, теряемая с излучени- ем	33,1
	68,8		68,8

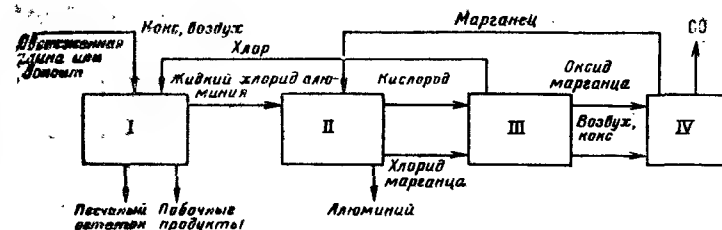
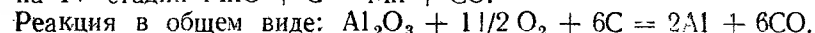
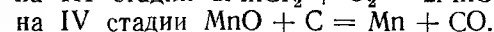
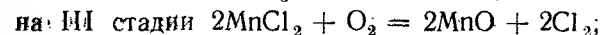
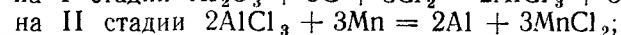
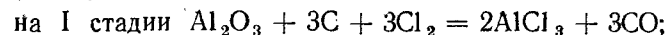


Рис. 3.5. Получение алюминия по методу Toth:

стадия I — получение чистого хлористого алюминия; стадия II — получение и отделение алюминия; стадия III — окисление хлорида марганца; стадия IV — восстановление оксида марганца

таловложений. Большинство специалистов алюминиевой промышленности [3.5, 3.6] согласно с тем, что эффективность процессов электролиза на фирме Hall—Hergoult достигается за счет реализации большей части методов по экономии энергии. В настоящее время исследования направлены на другие усовершенствования, такие, например, как производство малоизнашиваемых анодов.

Разрабатываются две новые технологии производства алюминия. Одна из них — процесс Toth (рис. 3.5), который в основном является химическим, а не электролитическим [3.15]. При этом процессе протекают следующие реакции:



Что касается энергоиспользования, то принципиальное различие между процессом Toth и системой Bayer/Hall—Hergoult состоит в том, что для процесса Toth используется уголь (или кокс), а не электроэнергия. На 1 т алюминия теоретически расходуется 55 ГДж, и, кроме того, в технологии Toth больше возможности экономить энергию за счет использования вторичной энергии. Исследуются также и некоторые нетрадиционные электролитические процессы, одним из которых является система Alcoa, основанная на получении алюминия при электролизе хлорида алюминия. По сравнению с существующим методом предполагается экономить около 30% энергии. Рабочие температуры здесь гораздо ниже и анод не изнашивается в процессе электролиза. Экономия топлива при этом может составить до 60 ГДж/т.

Скрап, получаемый на алюминиевом заводе, составляет около 40% всего сырья. Большая его часть возвращается в цикл, но заключенная в нем энергия настолько велика, что восстановление ее из скрапа может дать значительную экономию. В большинстве стран, производящих алюминий (США, Япония, ФРГ и Великобритании), принято, что в цикл в различных пропорциях возвращается даже тот скрап, который поступает на завод извне. Так, 33% алюминия, получаемого в

Великобритании, производят из скрапа; для США — основного производителя алюминия — эта доля меньше 20%.

В настоящее время в алюминиевой промышленности испытаны уже все пути экономии энергии за исключением тех случаев, когда производители будут вырабатывать собственную электроэнергию. Однако, если будет внедрен процесс Toth, могут появиться аналогичные, как и в производстве стали, возможности утилизации теплоты.

3.3. Химическая промышленность

Химическая промышленность столь разнообразна, а число технологических процессов столь велико, что невозможно рассмотреть всю химическую промышленность в целом. Однако, выбирая ряд процессов и описывая соответствующие установки в связи с применяемыми или предполагаемыми методами экономии энергии, можно, без сомнения, определить другие области, где могут действовать те же принципы экономии энергии. Ниже рассматриваются производства аммиака [3.6], метанола [3.16] и этилена [3.17]. Метанол и этилен используются в производстве полиэфирного волокна; этилен является основой для полиэтилена, а также важным компонентом в производстве синтетического каучука. Аммиак применяется в производстве удобрений.

В Великобритании химическая промышленность занимает третье место по энергопотреблению вслед за производством чугуна и стали и металлообрабатывающей промышленностью.

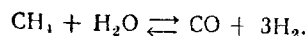
Как уже было показано, на долю химической промышленности Нидерландов приходится 12% общего энергопотребления в стране и 1/3 общего промышленного энергопотребления. Таким образом, именно от этой отрасли промышленности в наибольшей степени зависит экономия энергии, и производители химикатов в течение уже многих лет ищут пути достижения этой цели.

В химической промышленности Великобритании имеется тенденция замены твердого топлива природным газом и нефтью. Надежда на природный газ и нефтепродукты в те времена, когда они были доступны и дешевы, привела к переоценке методов экономии энергии. Увеличение цены на нефть в 1973 г. привело к тому, что многие производители химикатов стали искать пути использования технологических газов в качестве топлива и в случае удачных опытов со сжижением и газификацией угля возвращаются к этому виду топлива.

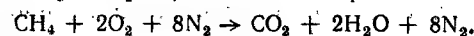
Производство аммиака. В [3.6] приводится анализ этого процесса, однако со времени опубликования работы появились дополнительные возможности утилизации теплоты с помощью тепловых насосов, что будет также рассмотрено в этой главе.

Аммиак получают из метана на отдельных стадиях реакции, что видно из рис. 3.6 [3.19].

Стадия риформинга. На этой стадии используется пар для конверсии метана. Реакция имеет вид



После того как в первичной стадии риформинга пройдет большая часть реакции, в газ добавляют некоторое количество кислорода до получения хорошо сбалансированной смеси $\text{N}_2 - \text{H}_2$. Процесс идет по реакции



Эта реакция горения увеличивает температуру почти до 1000 °C, снижая содержание метана до 0,2%. В результате получают газообразную смесь CO , CO_2 , H_2 , H_2O и N_2 .

Конверсия. Газовая смесь охлаждается на этой стадии приблизительно до температуры 350 °C. При контакте с соответствующими катализаторами начинается реакция со сдвигом вправо по следующему уравнению:

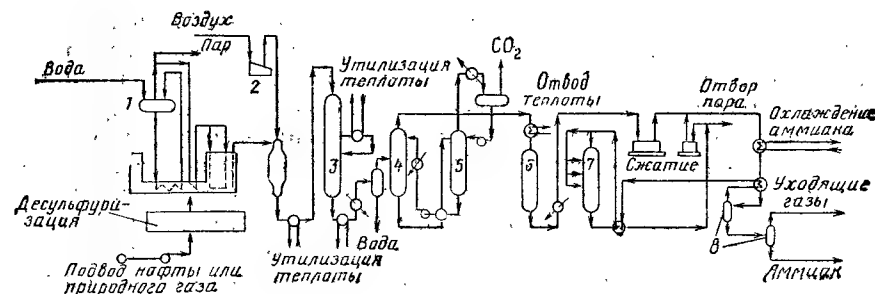
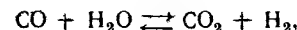
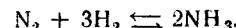


Рис. 3.6. Схема крупной установки по производству аммиака:

1 — паровой котел; 2 — компрессор; 3 — конвертер CO ; 4 — абсорбер CO_2 ; 5 — отпарная колонка для вывода CO_2 ; 6 — метанатор; 7 — колонна синтеза; 8 — сепаратор

Удаление CO_2 . CO_2 удаляют из смеси за счет абсорбции в соответствующем растворителе. Оставшиеся следы CO и CO_2 превращаются в CH_4 метанированием.

Синтез. Смесь $\text{N}_2 - \text{H}_2$ затем компримируют приблизительно до 25 МПа, нагревают до температуры 450 °C и превращают в NH_3 . Процесс идет по реакции



Поскольку газовая смесь содержит следы CH_4 и аргона, для их ограничения проводится сдвиг последних из синтез-газа (5—8%).

Выделение теплоты при синтезе аммиака из метана. В результате четырех реакций при синтезе аммиака выделяется теплота:

Реакция	Теплота, кДж/моль
$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	—206
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	+41*
$\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$	+46**
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 8\text{N}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 8\text{N}_2$	+804*

* На 1 моль C .

** На 1 моль NH_3 .

Общее количество теплоты, выделившейся при синтезе на основе метана, пара и воздуха эквивалентно 34 кДж на 1 моль NH_3 .

На заводе производительностью 100 т аммиака в сутки компрессоры потребляют более 100 МДж/т энергии для получения давления, необходимого для процессов риформинга и синтеза. На практике большая часть потребностей в теплоте и электроэнергии обеспечивается за счет энергетического оборудования, работающего на сбросной теплоте газов, выделившихся в процессах риформинга и синтеза. Пар, который генерируется при давлении 10—12 МПа и расширяется

в турбине до давления 3 МПа, используется в процессе риформинга и для других целей. Общая эффективность завода по производству аммиака составляет 83%, а потребление энергии — приблизительно 35 ГДж на 1 т аммиака.

Теоретически можно добиться дополнительной 15%-ной экономии энергии. Однако практически имеются невосстановимые потери, включая потерю при конденсации, равные 2,1 ГДж/т, что снижает возможную экономию энергии до 6%.

В Нидерландах уже достигнута экономия энергии за счет использования крупных компрессоров с приводом от паровых турбин. Для

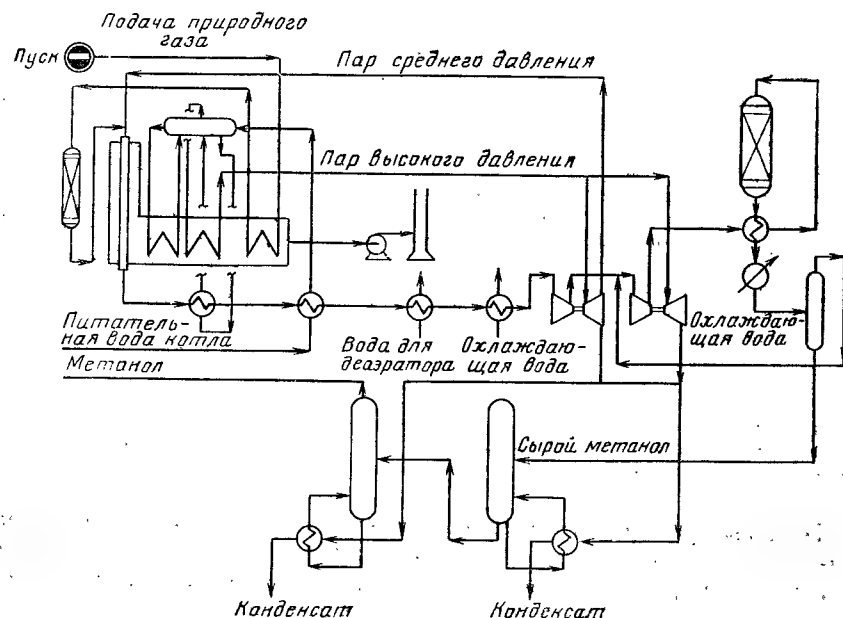


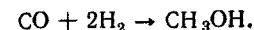
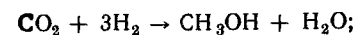
Рис. 3.7. Классическая схема завода по производству метанола фирмы ICI

привода компрессора могут также использоваться газовые турбины с использованием сбросной теплоты для подогрева воздуха для горелок риформинга. В этом случае расход энергии снижается до 33 ГДж/на 1 т аммиака.

Можно получить значительную экономию за счет использования низкопотенциальной теплоты, которая до настоящего времени считалась отходом. Очевидно, есть необходимость объединения аммиачного завода с другими промышленными установками, комплексами и пр. Именно в такой ситуации можно использовать тепловой насос. Если при этом удастся выработать дополнительное количество пара низкого давления с применением компрессора теплового насоса, приводимого газовым двигателем или газовой турбиной, можно получить дополнительную экономию. Конечно, для достижения высокой эффективности необходимо использовать сбросную теплоту от газовой турбины или двигателя. По причинам, которые будут рассмотрены в следующих главах, в данном случае неэкономично применять тепловые

насосы с электроприводом. Если в процессе синтеза будет применяться катализатор, активный при температуре 300 °С, а не при 450 °С, как в настоящее время, то рабочее давление может быть снижено и можно будет отказаться от газового компрессора, что даст 13%-ную экономию первичной энергии.

Производство метанола низкого давления. Метанол с применением катализатора на основе меди производится по следующим реакциям [3,19]:



Установка, работающая по этому методу, приводится на рис. 3.7 [3.16]. Природный газ предварительно нагревается в печи риформинга, затем удаляется сера и газ смешивается с паром среднего давления, с тем чтобы ускорить эндотермическую реакцию риформинга. Теплота продуктов сгорания газа в печи используется для нагрева воздуха, а также получения перегретого пара, который применяется для привода компрессора и в процессе синтеза. Теплота газов риформинг-аппарата используется для нагрева питательной воды котлоагрегата и воды в деаэраторе. Остаточная теплота газов риформинг-аппарата отводится с охлаждающей водой без дальнейшей утилизации. Затем газ сжимают до 10,3 МПа до ввода его в зону синтеза вместе с воздухом; весь газ нагревают до температуры реакции за счет теплоты отходящих газов колонны синтеза. Дальнейшее охлаждение газов из колонны синтеза осуществляется водой, в результате чего происходит конденсация сырого метанола. Остальные газы продувают и используют как топливо, а чистый газ сжимают в компрессоре для возвращения в технологический цикл.

Дистилляцию метанола осуществляют, используя отработанный пар низкого давления турбины (482 кПа).

Тепловые установки по производству метанола имеют производительность приблизительно 1100 т/сут с удельным расходом 33,9 ГДж/т.

Предложен ряд модификаций установки при относительно дешевом оборудовании, которые могут привести к уменьшению расхода энергии на заводе приблизительно на 10% [3.16], в том числе усовершенствования, которые показывают, как даже высокoeffективный химический процесс при тщательном изучении может быть значительно улучшен с использованием существующего оборудования:

усовершенствования на стадии дистилляции. При анализе данных, полученных при эксплуатации традиционной установки по производству метанола низкого давления, было найдено, что тепловые нагрузки на стадии дистилляции могут быть снижены без влияния на качество конечного продукта. Вследствие уменьшения расхода пара в ребойлере давление пара на привод турбокомпрессора составляет $8,3 \cdot 10^3$ кПа, а расход энергии нетто снижается до 33,6 ГДж/т;

использование теплоты газа риформинга на стадии дистилляции. Установлено, что в газе риформинга содержится достаточное количество теплоты, которая может быть использована на дистилляционной установке, а также для предварительного нагрева питательной воды и воды, направляемой в деаэратор. В результате расход теплоты на установке снизится до 32,5 ГДж/т. Такая усовершенствованная схема приводится на рис. 3.8 [3.16];

использование сбросной теплоты для повышения давления пара.

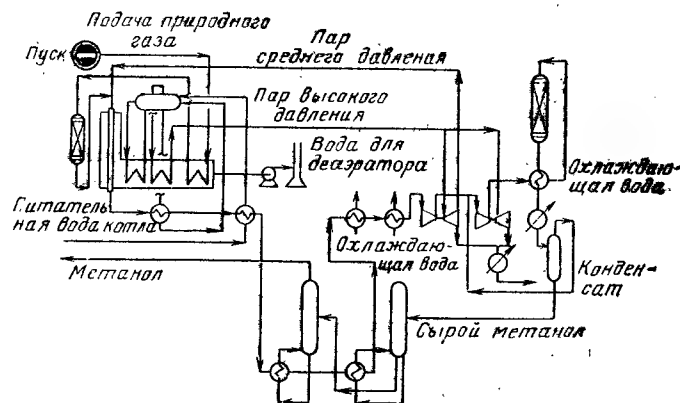


Рис. 3.8. Реконструкция установки по производству метанола для утилизации теплоты газа риформинга с помощью дистилляционного ребойлера

На вышеописанных установках с охлаждающей водой отводится большое количество теплоты, выделяющейся в процессе синтеза. Используя некоторую часть этой теплоты, можно повысить параметры пара среднего давления (2930 кПа), чтобы его можно было вводить в печь риформинга. При этом общий расход топлива снижается на 9%. Необходимые для этого усовершенствования приводятся на рис. 3.9; использование теплоты, выделяющейся при синтезе для нагрева питательной воды котла.

Наиболее эффективным методом использования теплоты синтеза является нагрев питательной воды котла, что показано на рис. 3.10. Наряду с уменьшением необходимости в дополнительном оборудовании по сравнению с другими методами это дает экономию около 11%. Кроме того, на стадии дистилляции можно использовать теплоту га-

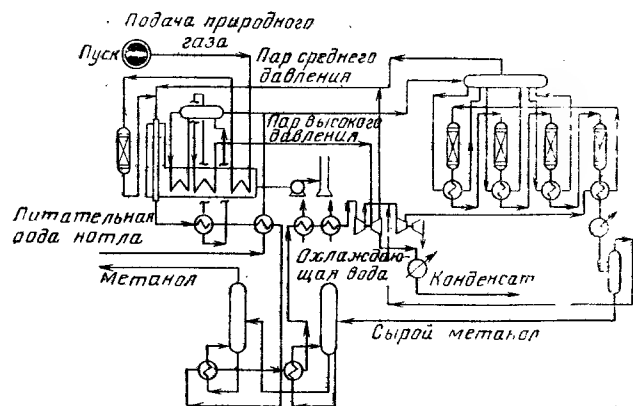


Рис. 3.9. Повышение среднего давления пара как альтернатива сброса теплоты в систему водяного охлаждения

зов риформинга, уменьшая нагрузку конденсатора (по газам и сырому метанолу) на 30%.

Считается также, что давление продувочного газа (10,3 МПа) из колонны синтеза может быть использовано в утилизационной турбине мощностью 3,7 МВт, что более чем достаточно для удовлетворения потребности заводов в электроэнергии.

Приведенный выше анализ не дает всей картины в отношении экономии энергий. Здесь не приводится экономическая оценка эффективности капитальных вложений, связанных с уменьшением расхода охлаждающей воды (расход на реальном заводе составляет $1,76 \cdot 10^5$ л/т

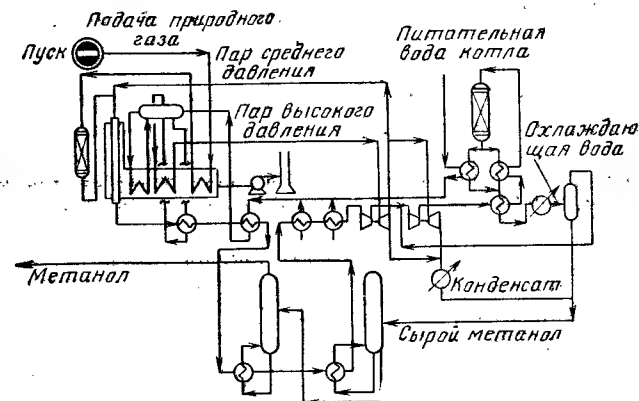


Рис. 3.10. Использование теплоты, выделившейся при синтезе, для нагрева питательной воды котла

метанола, а предполагаемый завод расходует только $1,32 \cdot 10^5$ л/т). (Если вода до реконструкции сбрасывается до охлаждения, то экономия может быть весьма значительной. В Великобритании вода может стоить до 11 пенсов за 1000 л.)

Если воду охлаждать и возвращать в цикл, то удастся снизить расход энергии в градирнях и на насосы. Наибольшей экономии можно добиться, если применять рециркуляцию охлаждающей воды.

Предложенная выше схема усовершенствований в той или иной степени связана с увеличением капиталовложений.

Производство этилена. Так же как и в производстве метанола, в производстве этилена открываются различные возможности по использованию энергосберегающей технологии, в особенности ряда методов по утилизации сбросной теплоты.

Количество высокопотенциальной теплоты, выделяющейся во время пиролиза на крупном этиленовом заводе (1 тыс. т в сутки), составляет примерно 120 МВт, поэтому очень важно утилизировать эту энергию. На рис. 3.11 приводится система автономной утилизации сбросной теплоты, в которой уходящие газы печи крекинга 1 при температуре 1100–1200°С используются в теплообменниках для нагрева питательной воды котла 2, сырья 3 и получения технологического

пара 4. В пароперегревателе 5 осуществляется также перегрев пара котлоагрегата 6 для процесса пиролиза и других целей. Уходящие газы отводятся в дымовую трубу 7.

В системе централизованной утилизации сбросной теплоты, показанной на рис. 3.12, теплообменники устанавливают в вытяжном канале из каждой печи, но они служат исключительно для выработки технологического пара и предварительного нагрева сырья. Весь нагрев питательной воды котлоагрегата и перегрев пара осуществляют с помощью теплообменников, расположенных в общем газоходе. На этой стадии газы охлаждаются до температуры 500—600 °С. Низкая температура уходящих газов и более высокий перепад давления приводят

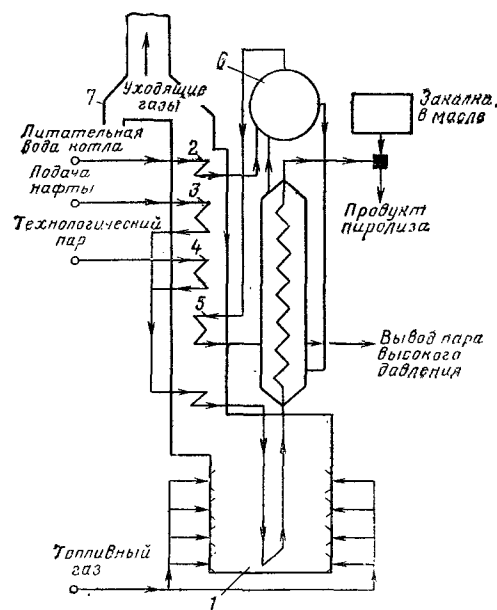
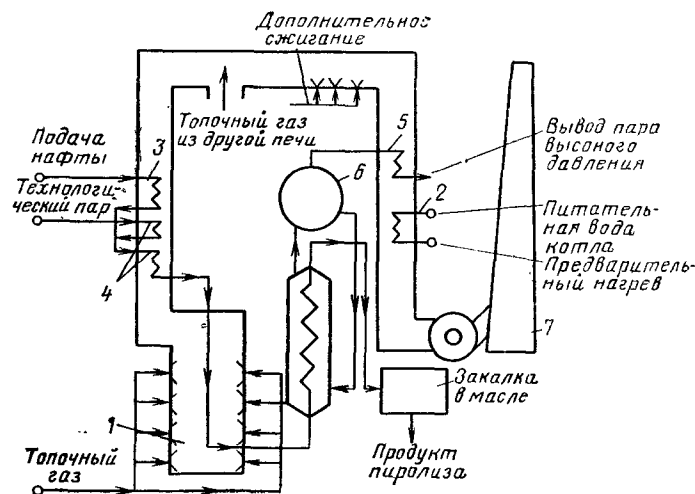


Рис. 3.11. Печь крекинга с системой интегрированной утилизации сбросной теплоты

Рис. 3.12. Печь крекинга с централизованной системой утилизации сбросной теплоты:

1 — печь крекинга; 2 — экономайзер; 3 — теплообменник для нагрева сырья (нафты); 4 — теплообменник для получения технологического пара; 5 — пароперегреватель котла; 6 — барабан котла; 7 — дымовая труба



к необходимости создания принудительной тяги, тогда как в системе автономной утилизации, очевидно, достаточно и естественной.

При выборе оптимальной схемы при проектировании и реконструкции завода необходимо учитывать не только повышение энергетической эффективности, но и капитальные затраты и эксплуатационные расходы, надежность схемы, а также экологические факторы. Система автономной утилизации теплоты желательна там, где завод состоит из восьми или менее печей крекинга; для более крупного завода больше подходит система централизованной утилизации, хотя общая стоимость теплоутилизационного оборудования составляет небольшую долю в расходах завода в том и другом случае. С точки зрения надежности очевидно, что повреждение в любой из восьми линий требует отключения только того агрегата, в который включена система утилизации. Применяя же систему централизованной утилизации, при ремонте соответствующих паропроводов должно останавливаться все производство. Тем не менее в ситуациях, когда обязательны высокие дымовые трубы по соображениям защиты окружающей среды, централизованная утилизация предпочтительнее, поскольку здесь требуется только одна дымовая труба.

3.4. Нефтеперерабатывающая промышленность

К продуктам заводов этой отрасли относятся топливо для двигателей и самолетов, дизельное топливо, топливная нефть, сжиженный нефтяной газ, смазочные масла и сырье для химических заводов. (Сырая нефть очищается до нафты, которая служит сырьем для производства ацетилена, метанола, аммиака и многих других химикатов.)

В США, где сосредоточено более 20% всей мировой мощности по нефтепереработке, около 15% общего промышленного энергопотребления приходится именно на эту отрасль. Она стоит на третьем месте по энергопотреблению вслед за производством чугуна и стали и химической промышленностью [3.20, 3.21].

В Нидерландах нефтеперерабатывающая промышленность является вторым крупным потребителем энергии, хотя общая мощность заводов составляет только 65% мощности этой отрасли в Великобритании. Являясь инициаторами «международной» концепции развития промышленности, в нефтеперерабатывающей промышленности гораздо чаще применяют общую энергосберегающую технологию, чем в других отраслях.

Не менее 25% себестоимости продукции нефтеперерабатывающих заводов составляют затраты на энергоресурсы. Именно поэтому технологи по нефтепереработке хорошо знакомы с вопросами энергетики, и большинство передовых методов по сохранению и утилизации энергии уже применяется на заводах.

Основными потребителями энергии на всех заводах по нефтепереработке являются дистилляционные, отпарные и разделительные колонны, где сырая нефть разделяется на ряд конечных продуктов — от пропана до тяжелой топливной нефти. 50% потребляемой энергии

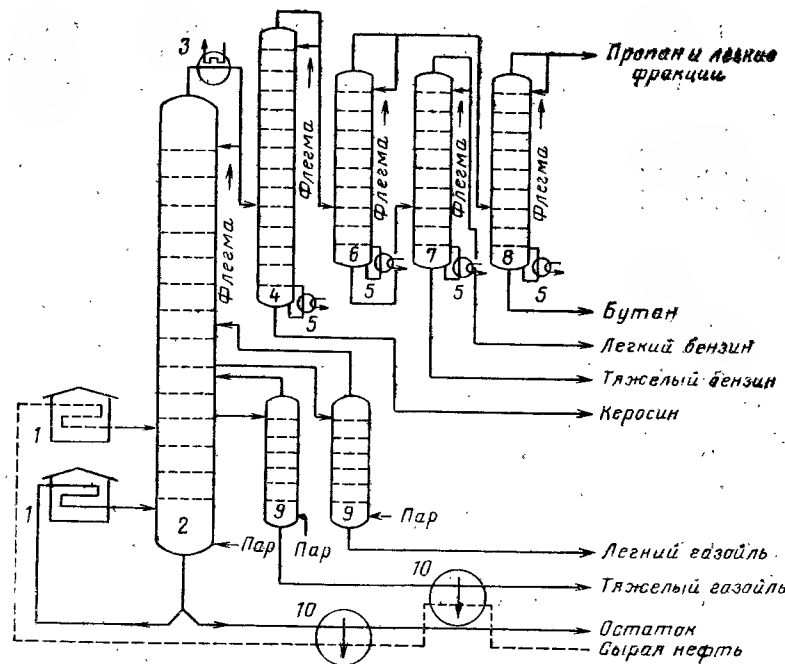


Рис. 3.13. Схема дистилляционной установки сырой нефти:

1 — нагреватель; 2 — колонна для фракционирования сырой нефти; 3 — конденсатор; 4 — колонна легкого дистиллята; 5 — рибойлер; 6 — дебутанизатор; 7 — колонна для разделения бензина; 8 — депропансатор; 9 — разделительная колонна; 10 — теплообменник

идет на колонну первичной фракционной дистилляции, приведенной на рис. 3.13 [3.22]; эта энергия расходуется для нагрева сырой нефти и получения пара, используемого в колонне. Еще 35% энергии потребляется в установке для конверсии, а остальные 15% — для конечной обработки продуктов.

Доступными методами по увеличению эффективности использования топлива на нефтезаводах являются:

- улучшение контроля за процессами, использование для этой цели вычислительной техники;

- повышение эффективности утилизации сбросной теплоты;

- увеличение КПД печи;

- увеличение КПД дистилляционной установки путем использования дополнительных стадий;

- усовершенствование тепловых насосов;

- использование «общезнергетических» схем;

- использование низкопотенциальной сбросной теплоты для теплоснабжения.

Эти методы вполне применимы для большого числа энергоемких отраслей промышленности. Увеличение КПД дистилляционных установок относится исключительно к нефтехимическим комплексам. При-

менение системы контроля с вычислительной техникой направлено на обеспечение оптимальной эффективности использования топлива и дает много преимуществ в управлении энергопроизводительностью отдельных узлов завода. Такие системы внедрены на большинстве новых крупных заводов, если не на всех.

На современных заводах широко используется утилизационное оборудование. Дальнейшие капиталовложения в утилизационное оборудование зависят от соотношения цен на оборудование и энергии. Анализ показывает, что за счет установки дополнительного утилизационного оборудования можно получить экономию около 5% стоимости затрачиваемой энергии. Это исключает повышение КПД печи, которого можно добиться, используя большее число подогревателей воздуха, главным образом на печах с низким КПД.

Конструкция дистилляционной установки подробно рассмотрена во всех учебниках по химической технологии, поэтому здесь она опущена. Ввод теплоты в дистилляционную колонну необходим для процесса разделения, а также для нагрева подаваемого газа, который осуществляют до ввода в колонну. Увеличивая в колонне число тарелок, можно уменьшить стоимость сэкономленной энергии равна капиталовложениям в установку новых тарелок.

Считают, что эффективность применения теплового насоса компрессоров с электроприводом на нефтеперерабатывающих заводах несколько уменьшается с учетом низкого КПД выработки электроэнергии и при рассмотрении электропотребления в целом. Но электроэнергия — не единственный источник энергии для привода компрессоров. Если для нефтеперерабатывающего завода мощностью $10 \cdot 10^6$ т/год использовать все топливо, предназначенное для технологических процессов для газовой турбины, можно получить 200 МВт электрической мощности и такое количество отработанных газов турбины при температуре 600°C , которое обеспечит потребность установок в технологической теплоте. Предполагается также часть механической энергии использовать для привода воздушного компрессора, подающего воздух в зону горения с давлением 1—1,2 МПа. Можно также использовать энергию для привода фреонного компрессора, обеспечивая работу теплового насоса без использования дорогостоящего первичного топлива, которое необходимо при использовании теплового насоса с электроприводом. Было подсчитано, что низкопотенциальная теплота, сбрасываемая заводом, в случае использования ее для теплоснабжения дает общую экономию расхода топлива 20%, но совершенно очевидно, что капиталовложения для внедрения такого проекта будут очень высоки и что это — задача на среднюю и дальнюю перспективу.

ЭНЕРГОЕМКИЕ ОТРАСЛИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ (ГРУППА 2)

4.1. Целлюлозно-бумажная промышленность

В Великобритании на долю целлюлозно-бумажной промышленности приходится около 5,7% общего промышленного энергопотребления. В последнее время намечилось некоторое увеличение потребления энергии. Удельные нормы энергопотребления составляют в Нидерландах 18,8 ГДж/т, а в США 30—32 ГДж/т, по данным отчета НАТО около 25 ГДж/т. В этом отчете сделана попытка определить энергетическую составляющую в себестоимости продукции целлюлозно-бумажной промышленности. Она составила для бумаги 30% (для алюминия 40, цемента 50%).

Было подсчитано [4.1], что при производстве бумаги и картона на объединенном заводе потребляется пар и электроэнергия в соотношении 3 : 1. Типичное потребление пара и электроэнергии на 1 т продукта составляет 12 и 4 ГДж соответственно. Эти цифры определяются из общего энергопотребления, причем потребность в технологической теплоте не менее чем в 2 раза превышает потребность в электроэнергии. На тенденции энергопотребления в отрасли за последние годы влияли следующие основные факторы:

увеличение производства высококачественных продуктов, что, естественно, ведет к повышению расхода энергии;

обезвреживание отходов, как жидких, так и газообразных, что также ведет к увеличению расхода энергии на заводе;

рост рециркуляции отходов, ведущий к снижению использования древесного сырья;

модернизация оборудования, включающая улучшение контроля за технологическим процессом и энергохозяйством завода и ведущая к снижению энергопотребления.

Процесс производства. Основным сырьем для производства бумаги является древесина. В химическом процессе варки древесины под давлением в растворе натрия или аммиака растворяется лигнин и отделяется древесное волокно, которое затем транспортируется на завод. (В некоторых случаях производство древесного волокна осуществляется на том же заводе, где производят готовую бумагу или картон.) Преимуществом трансформации древесины в древесное волокно является возможность использования коры и отработанного раствора как топлива. Теплота сгорания коры примерно 8141 кДж/кг, а отработанного раствора — 16 282 кДж/кг. Если применяется раствор на основе натрия, то зола, образующаяся при сжигании, может использоваться и далее для получения химикатов, пригодных для вторичного использования в варке древесной щепы.

Древесное волокно, смешанное с водой, является сырьем для получения рулонной бумаги. Типичная бумагоделательная машина приводится на рис. 4.1 [4.5]. Сырье поступает на непрерывно движущуюся сетку, где образуется лист. Большая часть воды, введенная в древесное волокно, отводится, и затем масса поступает на механическую сушку, которая осуществляется специальными прессами.

После выхода бумаги с последнего пресса содержание воды в листе снижается приблизительно до 60%. Затем бумага поступает на сушку, в результате

которой содержание воды должно снизиться приблизительно до 7%. Это — наиболее энергоемкая стадия процесса.

Исследуются различные способы сушки, но обычно применяется испарение воды из бумаги в тот момент, когда она проходит вокруг цилиндров, обогреваемых изнутри паром. Нагрев бумаги идет очень медленно, до тех пор пока вся вода в бумаге будет иметь достаточно высокую температуру, чтобы началось испарение.

Процесс сушки должен тщательно регулироваться. Если цилиндр слишком раскален, особенно на ранних стадиях сушки, быстрое ис-

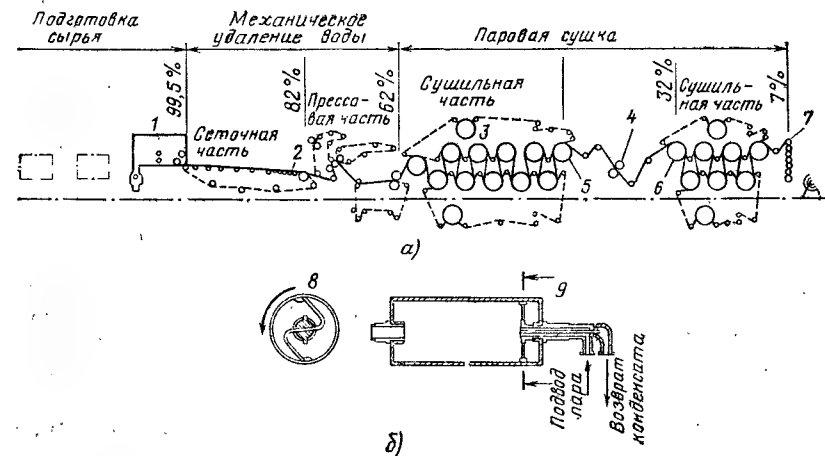


Рис. 4.1. Схематическое изображение процесса производства бумаги (а) и вертикальный разрез бумагоделательной машины (б):

1 — бак постоянного напора; 2 — отсасывающие ящики; 3 — сукносушильный цилиндр; 4 — сглаживающий пресс; 5 и 6 — сушилки; 7 — каландр; 8 — контактный башмак; 9 — цилиндр. Цифры — влажность, %

парение может вызвать отслоение бумаги от цилиндра, создавая возможность повреждения. Кроме того, для однородности качества необходим равномерный подвод теплоты к рулону, особенно на цилиндре. Слишком быстрая сушка на ранних стадиях может привести также к ломкости волокна. В момент подвода пара к цилиндру и его распределения очень важно определить равномерность нагрева и быстро удалить конденсат из цилиндра, чтобы предотвратить его скопление на периферии цилиндра.

Процесс сушки может быть значительно улучшен за счет качества воздуха вокруг цилиндров, и в номинальных условиях делают все, чтобы ускорить отвод влажного воздуха из этой зоны. Совсем недавно стал применяться принудительный конвективный теплообмен между воздухом и внешней стороной бумаги, когда она проходит вокруг цилиндров. Способ подачи нагретого воздуха к поверхности бумаги приводится на рис. 4.2 [4.5].

В некоторых случаях этот способ дает возможность утроить количество испаряемой влаги (обычно она составляет 15 кг/м² поверх-

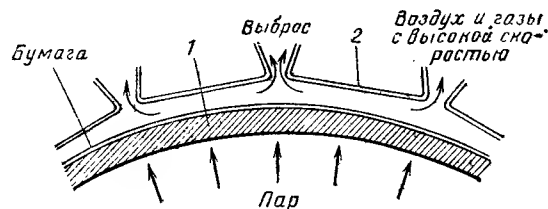


Рис. 4.2. Вынужденный теплообмен при сушке бумаги на сушильном цилиндре:
1 — обод цилиндра; 2 — подающие сопла

ности цилиндра в час). Тепловой баланс бумагоделательной машины представлен на рис. 4.3 [4.5].

Имеются значительные потенциальные возможности использовать теплоутилизационное оборудование для утилизации теплоты влажного воздуха сушилки до его выброса в атмосферу. С помощью одной такой установки утилизируется 3 МВт; теплота идет на нагрев приточного воздуха для обогрева крыши (для предотвращения конденсации), на обогрев фундамента и другие цели. На заводе, где применяется принудительный конвективный теплообмен, рекомендуется также использовать теплоту влажного воздуха для предварительного нагрева воздуха, поступающего в воздухоподогреватель.

Комбинированная выработка электроэнергии и пара. Бумагоделательная машина производительностью 10 т/ч имеет тепловую мощность приблизительно 30 МВт и электрическую 3,5 МВт. Несмотря на то что большая часть пара, необходимого для нагрева, имеет низкое давление, пар вырабатывается относительно высокого давления для выработки электроэнергии в противодавленческой турбине. На бу-

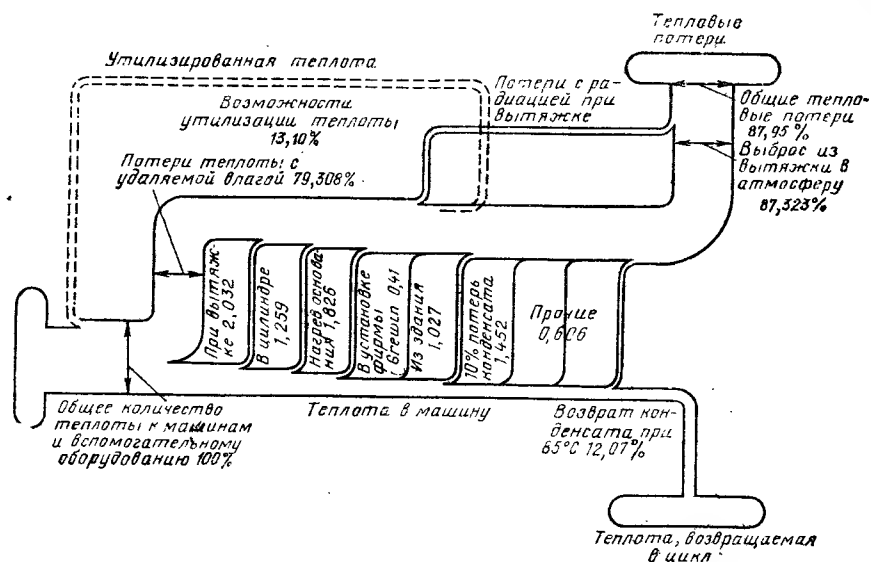


Рис. 4.3. Тепловой баланс бумагоделательной машины

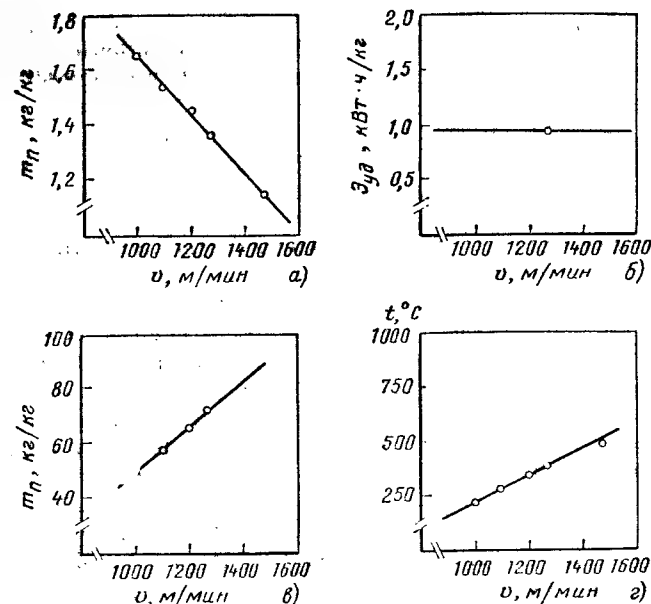


Рис. 4.4. Структура расхода энергии в целлюлозно-бумажной промышленности на примере машины по изготовлению тонкой бумаги фирмы Escher Wyss:

а — зависимость расхода пара на 1 кг бумаги m_p от скорости машины v ; б — зависимость удельного расхода электроэнергии $\mathcal{E}_{уд}$ от скорости машины; в — зависимость удельного расхода газа m_g от скорости машины; г — зависимость температуры t от скорости машины

мажном заводе, где одновременно производят целлюлозу и бумагу, на установке твердого картона и в варочном котле используется пар с давлением 2400 кПа, на установке бумажной упаковки — с давлением 760 кПа, в то время как для сушильных цилиндров машины по изготовлению газетной бумаги идет пар с давлением только 172,5 кПа. К основным потребителям электроэнергии относятся дефибреры, варочный котел и приводы для цилиндров на всех сушильных установках.

Вследствие того что бумага производится разного качества и для каждого сорта бумаги используется свой способ производства, это соотношение может быть различным. На энергопотребление влияет также состав сырья, необходимое количество продукта и производительность машины. Цифры, приведенные на рис. 4.4 [4.6], относятся к машине (фирмы Escher Wyss) по изготовлению тонкой бумаги, которая находится в эксплуатации с 1974 г. (газ сжигается для нагрева воздуха, используемого в процессе сушки). Расход пара на 1 кг продукта снижается с увеличением скорости машины, тогда как расход электроэнергии в основном постоянен. В связи с этим необходима такая энергетическая установка, которая позволяла бы при необходимости увеличивать выработку пара, а электрическую нагрузку поддерживать постоянной.

На расход теплоты и электроэнергии влияет еще один фактор, который ранее не упоминался, — число остановов машины. Большая часть этих остановов происходит из-за повреждений в бумажном рулоне, и хотя эти остановки очень кратковременны, все же они сопровождаются внезапным падением потребления пара. Несмотря на это процесс продолжается, идет подготовка сырья, процессы обработки на цилиндрах идут нормально и поэтому потребность в электроэнергии остается почти неизменной. В зависимости от установки и изготавливаемой продукции отношение расхода электроэнергии к расходу теплоты на тонну продукции может изменяться в пределах 35—240

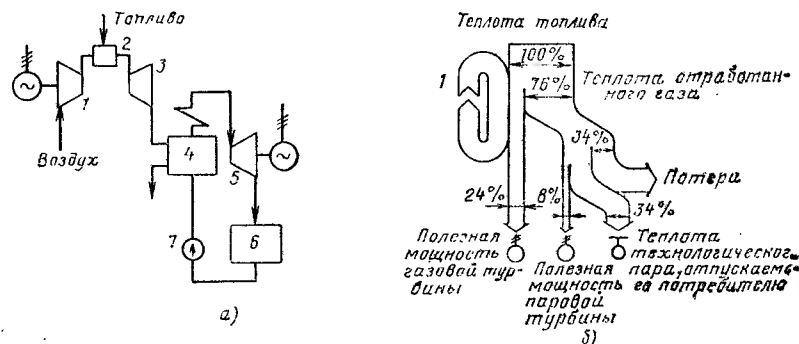


Рис. 4.5. Схема промышленной парогазовой ТЭЦ (а) и тепловой баланс (б): 1 — компрессор; 2 — камера сгорания; 3 — газовая турбина; 4 — котел-утилизатор; 5 — турбина с противодавлением; 6 — потребитель пара; 7 — питательный насос

кВт·ч/ГДж. Такой большой диапазон изменения выработки электроэнергии на 1 ГДж отпущенной теплоты (Эт. п) очень трудно обеспечить с помощью существующих паровых турбин с противодавлением.

На рис. 4.5, а приводится схема промышленной парогазовой ТЭЦ, состоящей из газовой турбины 3, сбросная теплота которой используется в котле-утилизаторе 4 для выработки пара, направляемого в турбину с противодавлением 5. Пар из турбины с давлением около 0,3 МПа используется в технологических процессах.

Ниже приводятся основные технико-экономические характеристики этой установки:

Теплота топлива, подводимого к камере сгорания ГТУ, ГДж/ч	146,5
Электрическая мощность ГТУ, кВт	9600
Производительность котла-утилизатора, т/ч	21,6
Электрическая мощность утилизационной турбоустановки, кВт	3120
Начальные параметры пара перед турбиной:	
давление, МПа	4
температура, °С	430
Количество теплоты, отпускаемой потребителю, ГДж/ч	50,2
Удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении, кВт·ч/ГДж	255
Удельный расход топлива на выработку электроэнергии, г*/(кВт·ч)	238

* Условного топлива.

Из теплового баланса установки видно (рис. 4.5, б), что 34% подведенной энергии теряется с теплотой сбросных газов газовой турбины. Более высокая эффективность может быть получена в том случае, если часть этой теплоты применять для нагрева воздуха, используемого для сушки над цилиндрами. Это уже осуществляется на заводе по изготовлению тонкой бумаги, где отношение расхода электроэнергии к расходу теплоты на 1 т продукта очень высокое [4.7].

Нагрев от инфракрасного излучения. В настоящее время в бумажной промышленности исследуются и другие виды сушки. Ведутся опыты по использованию инфракрасных газовых нагревательных элементов, проходящих по всей ширине бумажной машины [4.5]. Установленные между механическими прессами и первым сушильным цилиндром, эти агрегаты имеют мощность 90 кВт.

Целью их установки является такой нагрев внешней поверхности рулона бумаги, чтобы теплоты, поступающей на внутреннюю поверхность первого цилиндра, было достаточно для немедленного испарения воды из рулона. Производительность системы при этом увеличивается. Предварительные эксперименты показали, что при таком способе рулон не повреждается, несмотря на то что в сушилках этого типа создаются более высокие скорости сушки. Единственный и основной недостаток нагрева от инфракрасного излучения связан с широким радиусом действия длины волны. Только относительно узкая часть спектра адсорбируется водой, в результате чего происходит испарение или повышение энтальпии.

Высокочастотный и микроволновый нагрев. Высокочастотный и микроволновый нагрев может эффективно использоваться для сушки бумаги (и для других процессов сушки), поскольку передает теплоту непосредственно туда, где она требуется, например воде, без потерь, связанных с теплопередачей, т. е. количество израсходованной энергии соответствует получению необходимой степени сухости [4.8].

С применением этого метода на последних стадиях производства бумаги, где содержание влаги особенно велико, расход первичной энергии может снизиться приблизительно до 50%, потери также снижаются с 8 до 4%. Затраты на эту систему нагрева окупаются через 2 года в результате экономии энергии.

Применение нетрадиционных технологических методов. Высказано предположение [4.3], что большее внимание следует уделять развитию нетрадиционных методов. Использование тепловых насосов (гл. 7) для сушки целлюлозы и электростатическая укладка сухого древесного волокна дают большую экономию энергии. Однако это — задача будущего, поскольку для внедрения этих методов необходимы значительные капиталовложения.

Мероприятия по экономии энергии. Большинство вышеуказанных методов способны дать существенную экономию энергии, но их внедрение требует значительных расходов, и поэтому было бы лучше использовать их на новых заводах или при замене старого оборудования.

В обзоре по вопросам энергопотребления в целлюлозно-бумажной промышленности [4.10] были показаны пути, которые могут приве-

сти к снижению расхода энергии в короткие сроки и без больших капиталовложений. Обзор был всесторонним и включал результаты бесед с руководством и инженерно-техническим персоналом фабрик и заводов, посещения предприятий, рассмотрения новых технологий в отрасли, а также анализ ответов на вопросник, который был разослан 50 предприятиям.

В результате были предложены мероприятия по экономии электроэнергии и пара. Экономия электроэнергии может быть получена за счет:

- увеличения начального давления пара перед турбинами для выработки электроэнергии;

- максимального использования энергии в непииковые периоды графика нагрузки;

- установки конденсаторов для увеличения коэффициента мощности; замены резервных и непроизводительных насосов и электродвигателей;

- проведения профилактического ремонта вращающихся деталей машины;

- установки более производительного оборудования для варки; замены древесного волокна бумажными отходами;

- ограничения потребления электроэнергии до установленного максимума.

Экономия пара может быть получена за счет:

- работы котлов с максимальной производительностью, своевременного ремонта, контроля с помощью вычислительной техники;

- исключения утечек пара;

- контроля за потребностью в паре;

- исключения выработки пара в количествах, превышающих потребность процесса;

- теплоизоляции паропроводов, арматуры и емкостей;

- ограничения потребления пара до установленного максимума;

- использования технологического пара из отборов турбин установок общего назначения;

- снижения давления пара в котлах.

Экономия теплоты в технологическом процессе может быть достигнута за счет:

- установки механических экстракторов воды до сушилок (прессов, вакуумных сушилок);

- сбора и возврата конденсата для нагрева питательной воды котла;

- вторичного использования горячей промывочной воды;

- снижения качества используемой воды;

- исключение пересушки;

- утилизации сбросной теплоты уходящих газов котлов;

- утилизации сбросной теплоты воздуха над бумажными машинами;

- расширения использования холодной промывочной воды;

- очистки сушилок для повышения коэффициента теплопередачи.

В общем было установлено, что наибольшее внимание уделялось мерам по экономии энергии, связанным с утилизацией теплоты и воды и вторичным использованием ресурсов. Гораздо меньший интерес был

проявлен к методам, требующим капитальных затрат. Приведенные меры давали экономии энергии от 0,1 до 20%, а большинство индивидуальных мер привело к экономии от 0,5 до 2% потребляемой энергии.

4.2. Производство стекла

В Великобритании нет отдельно статистики о расходе энергии на производство стекла, однако имеющиеся данные позволяют предположить, что на производство стеклянной тары и листового стекла расходуется 90% всей энергии, потребляемой на производство фарфора, керамики и стеклоизделий. В производстве стекла наблюдается тенденция замены твердого топлива как источника энергии природным газом и жидким топливом.

Энергопотребление по стадиям технологического процесса показано на диаграмме рис. 4.6. Основное сырье: оксид кремния, известняк, карбонат натрия и измельченный стеклобой — смешивают и нагревают до тех пор, пока оксиды металлов не вступают в реакцию при температурах от 600 до 1200 °С. Образующиеся соединения расплавляются в печи до образования жидкого стекла, которое затем поступает на стадию формирования. На этой стадии стекло может выдуваться для получения тары и вытягиваться для получения труб и листового стекла с использованием флоат-процесса или других методов. В ходе формирования происходит охлаждение стекла с помощью принудительной воздушной вентиляции или другими способами, при которых происходит потребление электроэнергии.

Остаточные напряжения в стекле, имеющие место в большинстве процессов формирования во время быстрого затвердевания, последовательно удаляются в печах отжига, где происходит вторичный нагрев и охлаждение по определенной программе.

Процесс производства стеклоизделий непрерывный. Для получения 1 т продукции требуется приблизительно 15—20 ГДж теплоты. Наиболее энергоемким является производство технического стекла и ручное изготовление стеклоизделий (до 90 ГДж/т).

Стекловаренные печи. На стекольных заводах 70—80% общего расхода энергии потребляется при сварке стекла в стекловаренных печах. Поэтому для обеспечения экономии энергии наибольшее внимание должно быть уделено стекловаренным печам. Имеются два типа стекловаренных печей, классифицируемых по применяемой в них системе утилизации теплоты, а именно регенеративные и рекуперативные.

В печах регенеративного типа бассейн печи обычно имеет прямоугольную форму и разделен на два отделения — первое для варки, второе — для студки. В некоторых типах печей отходящие газы используют для подогрева воздуха, поступающего в печь на горение, а именно: за бассейном печи устанавливаются регенераторы, куда поступают отходящие газы с целью подогрева воздуха, идущего на горение. Температура в бассейне печи достигает 1450 °С, а температура отходящего газа за регенератором — около 400 °С. Потери теплоты с отходящими газами составляют 1600 кДж/кг, а потери теплоты через кладку печи — 3950 кДж/кг. Сведение потерь теплоты к минимуму зависит от качества кладки печи и ее теплоизоляции.

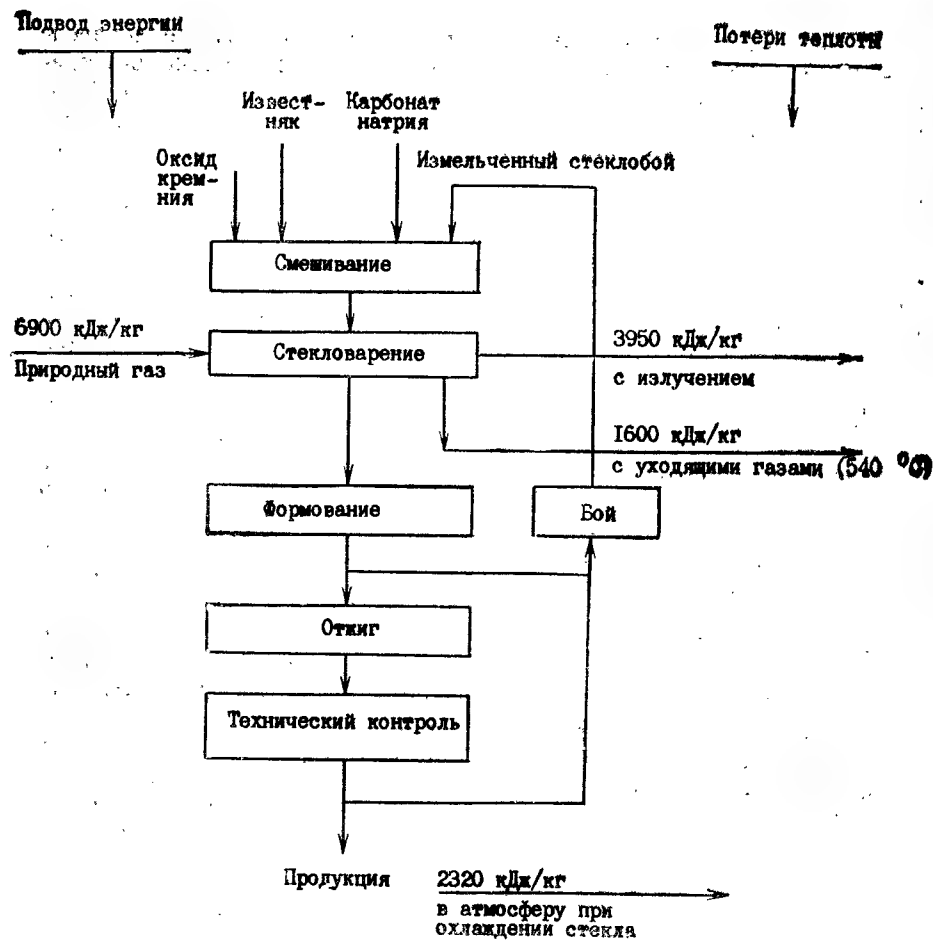


Рис. 4.6. Энергопотребление по стадиям технологического процесса производства стекла

В США предлагается использование печи с погруженными горелками. Ведутся исследования по эффективности на опытной и промышленной установках [4.12].

Несмотря на то что регенераторы на стекловаренных печах утилизируют существенную часть теплоты отходящих газов, потери теплоты остаются еще значительными. Котел-утилизатор, установленный за непрерывно действующей печью мощностью 250 т/сут и потреблением газа 4300 м³/ч, производит 5 т пара в час [4.13]. При этом температура газов на входе в котел составляет 320—340 °С. Котел обязательно должен быть снабжен шунтировкой и дымососом производительностью 140 тыс. м³/ч для обеспечения тяги. Опыт показывает, что установка котла не оказывает вредного влияния на работу печи и искусственная тяга способствует стабилизации работы стекловаренной печи.

До сих пор развитию рекуперации сбросной теплоты стекловаренных печей мешало отсутствие подходящих материалов, поскольку температура варки стекла постепенно повышалась и невозможно было найти приемлемых огнеупорных материалов для изготовления труб рекуператора. Но в настоящее время имеются керамические рекуператоры с хорошей изоляцией (гл. 3 и 7).

В Великобритании фирма Teisen Furnaces применяет рекуператоры на все большем числе крупных стекловаренных печей, размещая рекуператор ниже бассейна, и экономя таким образом площадь. Ведутся дополнительные разработки по усовершенствованию конструкции рекуператора и оптимизации систем автоматического контроля за печью, что делает печь более экономичной и улучшает качество продукта.

При сравнении действующих цен на регенеративные и рекуперативные печи было показано, что если расход топлива в регенеративной печи увеличивался примерно на 1% в месяц, а через четыре года — соответственно на 50%, то этого не наблюдалось в рекуперативной системе, которая со временем давала только 25—30% увеличения расхода топлива. Отходящие газы печи выводятся по двум вертикальным газоходам, у основания которых имеются отстойники для их очистки. Прежде чем подать подогретый воздух на горение, отходящие газы после очистки поступают в камеру смешивания, пройдя до этого через трубки трех рекуператорных камер. Допускается варьирование мощностью рекуператора, с тем чтобы получить оптимальные условия при сжигании топлива в каждом канале.

В настоящее время растет тенденция к повторному использованию стеклосырья, что позволяет уменьшить расход сырьевых материалов и топлива для его плавления благодаря более высокой теплопроводности стеклосырья в сравнении с сырьевой смесью, образующей основу загрузки печи.

Эффективность процесса горения. В производстве стекла, так же как и во многих других отраслях, где печи являются основными потребителями энергии, влияние эффективности процесса горения на расход топлива может быть значительным.

Улучшение эффективности процесса горения обычно достигается относительно просто (гл. 5), но при этом желательно иметь возможность проводить анализ состава газов, поступающих на горение.

Фирма BGIRA разработала оборудование для кислородного анализа, которое успешно применяется на газовых регенеративных печах. До установки этого оборудования на печи было проведено исследование условий горения через определенные промежутки времени путем измерения вертикального градиента концентрации кислорода во входных каналах печи [4.12].

В [4.11] высказано мнение, что в воздухе, подаваемом на горение, не полностью используется энтальпия азота, что приводит к потере 690 Дж/кг. Эти потери можно сократить, если обогатить воздух, подаваемый на горение, кислородом.

Процесс формования стекла. Очевидно, что на этой стадии мало что можно сделать для экономии энергии в значительном масштабе. Во

время формирования стекла должно охлаждаться, и обычно для этого применяют принудительное конвективное охлаждение воздухом. Ряд усовершенствований в охлаждении сводится к увеличению поверхности форм, что приводит к уменьшению себестоимости за счет снижения расхода энергии на вентиляцию. Количество рассеянной теплоты при этом высокое — 2320 кДж/кг, однако конфигурация многих формующих аппаратов такова, что утилизация этой теплоты крайне затруднена. Там, где для приведения в действие формующих установок используется сжатый воздух, должны применяться обычные методы экономии энергии, описываемые в гл. 5.

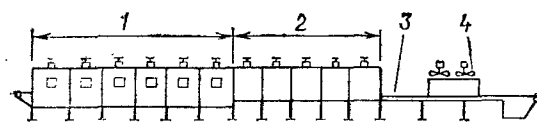


Рис. 4.7. Состав новой рециркуляционной печи для отжига стекла с полным температурным регулированием:
1 — секция нагрева и отжига; 2 — секция охлаждения; 3 — брызгальная секция; 4 — секция принудительного охлаждения

В США применяется охлаждение воздуха, подаваемого в компрессор [4.14]. При этом регенерируется теплота вторичного холодильника, в результате чего расход энергии на компрессор снижается почти на 25%. Эта теплота может быть также использована для нагрева сухого воздуха.

Процесс отжига. После формирования стекла остаточные напряжения снимаются пропуском стекла через печь отжига. Имеющиеся в настоящее время новейшие рециркуляционные печи отжига (рис. 4.7) потребляют значительное количество энергии, при этом используются вентиляторы мощностью до 45 кВт, а также горелки мощностью свыше 600 кВт. В печи отжига стекло сначала нагревается до температуры на несколько градусов выше точки отжига (для стеклянных силикатно-натриевых емкостей эта температура равна приблизительно 1000—1050 °С). Затем стекло пропускают через зону отжига, где оно постепенно охлаждается до температуры деформации, причем скорость охлаждения определяется необходимостью сведения до минимума перепада температуры между внутренней и внешней поверхностями стекла. После отжига стекло должно быть достаточно охлаждено, чтобы с ним можно было работать дальше. Поскольку в стекло после стадии отжига содержится 80% первоначальной температуры, необходимо его эффективное охлаждение, чтобы снизить до минимума длину печи и поддерживать выход продукта на достаточно высоком уровне.

В США ведутся исследования по экономии энергии в печах отжига и успешно прошли испытания ряд систем, усовершенствование которых производится для снижения эксплуатационных расходов [4.15]. В одном агрегате три из пяти отделений отжига, которые были оборудованы рециркуляционными вентиляторами и горелками, были заменены плоскими секциями, как показано на рис. 4.8. В остальных двух секциях сохранились горелки, вентиляторы, системы регулиро-

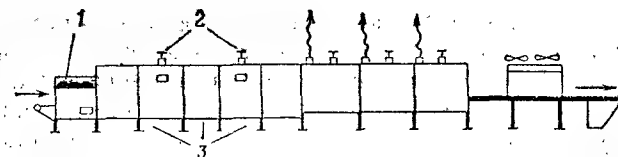


Рис. 4.8. Реконструкция рециркуляционной печи отжига (введение трех плоских секций отжига):

1 — секция радиационного нагрева; 2 — секции рециркуляционного отжига; 3 — плоские секции отжига

вания температуры, что оказалось вполне достаточным для поддержания правильного температурного режима отжига с экономией расхода газа и электроэнергии. Эта конструкция совершенствуется далее, из нее убирается все, кроме последней секции отжига (где стабилизация температуры наиболее важна) с естественным конвективным охлаждением, как это показано на рис. 4.9. Наряду с дальнейшим снижением расхода энергии снижаются также капитальные затраты и затраты на ремонт.

Еще одним новшеством в конструкции печи отжига является использование высокоскоростных горелок. Они достаточно эффективно обеспечивают циркуляцию теплоты, что позволяет отказаться от вентиляторов, так как продукты горения способны захватывать воздух и создавать достаточно высокий уровень турбулентности для обеспечения заданных температур.

Расход энергии также снижается за счет возвращения линии печного конвейера через внутреннюю часть печи, что предотвращает его охлаждение, и, следовательно, отпадает необходимость подогрева при вторичном вводе стеклоизделий в печь отжига.

До того как стекло на конвейере достигнет зоны вторичного нагрева, конвейер должен иметь температуру печи отжига, иначе он будет поглощать теплоту. Так как основание печи — чаще всего самая утолщенная ее часть, то предварительно нагретый конвейер будет способствовать значительному уменьшению времени вторичного нагрева.

Чтобы увеличить температуру конвейера с 38 °С до температуры отжига в печи производительностью 1 кг стекла в секунду, потребуется 260 кВт. Чтобы нагреть стекло с 480 °С (при размещении печи отжига вблизи формующих аппаратов) до 565 °С, требуется 84 кВт. При КПД процесса, равном 67%, общий расход природного газа составля-

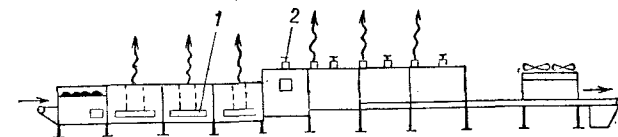


Рис. 4.9. Применение естественного конвективного охлаждения в печи отжига, исключая большинство вентиляторов:

1 — муфели конвективного охлаждения; 2 — зона управления отжигом

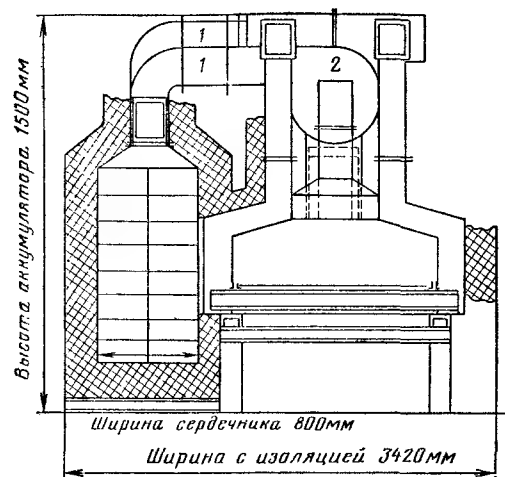


Рис. 4.10. Система аккумуляции теплоты для печей отжига:

1 — гофрированная мембрана; 2 — вентилятор

ет 13,8 л/с. Если же конвейер возвращается через внутреннюю часть печи отжига при потере теплоты от конвейера только 20%, общий расход газа падает до 5,5 л/с. Таким образом, годовая экономия в пересчете на цену газа $9,5 \times 10^{-2}$ пенс/МДж составит до 9070 ф. ст.

Были внесены предложения по использованию аккумуляции теплоты в печах отжига с электронагревом [4.16]. Если часть подведенной энергии может быть обеспечена за счет аккумуляции теплоты, то эксплуатационные расходы могут быть значительно снижены. Это также наиболее эффективно в тех случаях, когда нагрузка колеблется в течение суток.

Такая система, размещенная с одной стороны печи отжига, приводится на рис. 4.10. Ее аккумуляционная способность составляет 1,3 ГДж с четырехчасовым режимом перезарядки и максимальной производительностью 0,36 ГДж/ч (при средней 0,14 ГДж/ч).

Так как на печь отжига приходится небольшая часть (обычно 5%) общего расхода энергии в производстве стекла, то эти и другие меры могут привести к быстрой экономии топлива с малыми затратами. Этой же цели служит уменьшение расстояний между печами, формовочными аппаратами и печами отжига.

Резкое снижение удельного расхода энергии получают в том случае, если масса стеклянных изделий уменьшается. Новые, более легкие стеклянные молочные бутылки (170 г) могут отжигаться при меньшем расходе энергии. Необходимо также помнить, что в течение срока службы тара многократно моется или подвергается пастеризации или стерилизации, при этом ее опять нагревают и охлаждают. Бутылки с меньшей массой в течение этих операций потребляют меньше теплоты, что дает экономию энергии на молокозаводах, пивоваренных заводах и пр.

4.3. Пищевая промышленность

Приготовление и упаковка пищевых продуктов включают много различных процессов, большая часть из которых требует нагрева или охлаждения. Вследствие того что технология изготовления продукции пищевой промышленности в большинстве случаев тесно

связана с упаковкой (например, при производстве молока или консервированных продуктов), в данной главе рассмотрены вопросы технологии как приготовления, так и упаковки пищевых продуктов.

Определить размер энергопотребления в пищевой промышленности очень трудно, поскольку сюда входит много разнообразных процессов. Кроме того, до настоящего времени вопросы энергоиспользования в этой отрасли считались несущественными. В США в 1971 г. было подсчитано, что пищевая промышленность потребляет 900 ПДж [4.11]. В Нидерландах пищевая промышленность была поставлена на четвертое место среди энергоемких отраслей, так как ее доля в общем потреблении энергии в промышленности составляет 9% [4.2]. В Великобритании по статистике к пищевой промышленности относится производство продуктов питания, напитков и табачных изделий, причем энергопотребление в этой отрасли в 4 раза выше, чем в Нидерландах, однако методы статистического анализа в этих странах различны. Очевидно, что главной задачей было бы глубокое изучение всей отрасли пищевой промышленности с многообразием ее процессов и инженеры, работающие в этой области, гораздо лучше смогли бы справиться с такой задачей. Однако цель данной книги — процессы, приборы и оборудование, которые разработаны специально для пищевой промышленности, но могут быть весьма интересны для других отраслей. В основном это вопросы, тесно связанные с упаковкой пищевых продуктов.

Рассмотрим две специфические области пищевой промышленности: производство консервированных продуктов и молочную промышленность (в частности, технологию производства молока и затаривание в бутылки). При консервировании особый интерес представляют изменение температуры, технология нагрева и стерилизация. В молочной промышленности расходуется значительное количество энергии при подготовке тары для молока, а также для обработки самого молока. Эти отрасли выделены потому, что в них интенсивно используются вода и пар, и имеются значительные стоки, имеющие различную степень загрязнения. Очень важно в пищевой промышленности сохранять воду, особенно на пивоваренных заводах, заводах безалкогольных напитков и на молокозаводах; здесь вода становится таким же важным ресурсом, как и энергия из-за роста цены на нее. К увеличивающейся стоимости воды нужно прибавить еще и усилия по обработке стоков в соответствии с действующим законодательством о защите окружающей среды.

Количество жидких стоков на любом заводе можно свести к минимуму при хорошем хозяйствовании. Предотвращение ненужной утечки — это очевидная мера, так же как и рециркуляция воды, используемой для нагрева, охлаждения или промывки.

Консервирование пищевых продуктов. Энергоемкий процесс консервирования продуктов, в частности фруктов и овощей, представлен на рис. 4.11 [4.11]. Так же как и в других процессах, поддержание необходимой температуры является здесь основной целью для исключения перегрева, связанного непосредственно с потерей энергии. На расход энергии влияет состояние теплоизоляции установки, а также организация процесса нагрева. Наиболее желательно, там где возможно, использовать непрерывный, а не периодический процесс. Так, например, при стерилизации этот непрерывный процесс более приемлем, чем при варке.

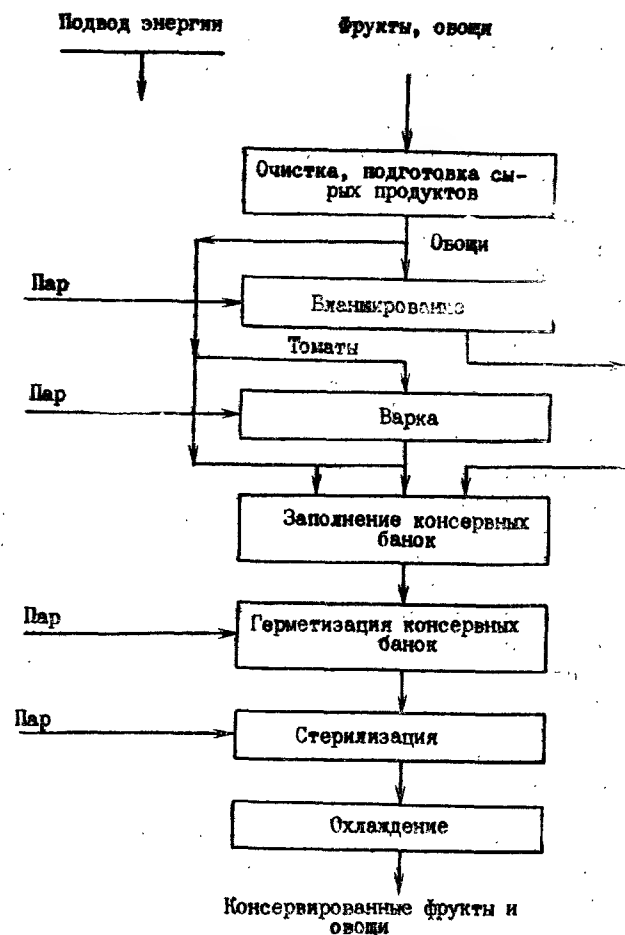


Рис. 4.11. Структурная схема процесса консервирования пищевых продуктов

Фирма British Food Research Association предлагает следующие методы экономии энергии в отрасли:

количество воды, добавляемой на отдельных стадиях процесса, должно быть минимальным, в противном случае на последующих стадиях необходимо затрачивать дополнительное количество энергии на ее испарение;

способ варки должен исследоваться с точки зрения эффективности энергоиспользования. Теоретически варка под давлением более эффективна, чем варка в вакууме или в обычных условиях;

в непрерывном процессе есть больше возможностей для утилизации теплоты. Во время охлаждения продукта следует использовать, где возможно, вторичную теплоту. Если продукт не нуждается в быстром охлаждении, следует применять естественную конвекцию;

если невозможно обойтись без периодического процесса, можно использовать различные емкости для сбора отработанной воды в целях последующего использования в технологическом процессе.

В производстве консервированных продуктов часто пренебрегают регулированием температуры, что приводит к перерасходу энергии.

В стерилизации, например, из-за незнания процесса переноса теплоты от консервной тары к содержимому может иметь место значительный перерасход энергии за счет избыточного нагрева для обеспечения качества продукции. Чтобы определить требуемые пределы нагрева, необходимо иметь полную характеристику продукта, поскольку разрушение бактерий зависит как от температуры, так и от времени. Например, обработка в течение 1 мин при температуре 120 °C дает такой же эффект для уничтожения бактерий, как и обработка в течение 100 мин при 100 °C. Так как зависимость времени нагрева от температуры имеет резко нелинейный характер, очень важно обеспечить точность измерения температуры. Если температура или в некоторых случаях давление может изменяться во время процесса нагрева в емкости, то можно точно определить количество необходимой теплоты за определенное время для создания условий стерилизации. Одним из методов определения температуры внутри консервной банки является радиотелеметрический метод [4.17—4.19], используя который, можно установить оптимальные условия для нагрева банок и поддержания необходимой температуры. Этот метод также может использоваться для оптимизации условий охлаждения для различных продуктов.

Варка продуктов до и после консервирования — один из наиболее энергоемких процессов в пищевой промышленности; на консервных заводах на него расходуется 1/2 общего потребления теплоты. Стерилизация может осуществляться рядом способов наряду с классическим (нагрев паром). Может применяться ионизация излучением, когда бактерии убиваются под действием интенсивных высокочастотных полей [4.3]. Это позволяет проводить стерилизацию без ощутимого нагрева продукта, что дает значительную экономию энергии. Фирма Food Research Ass изучает применение нагрева в кипящем слое как способ улучшения технологии консервирования продуктов, и это также дает увеличение энергетической эффективности процесса.

Молочная промышленность. Наиболее важным продуктом отрасли является молоко в бутылках. В ряде недавно опубликованных материалов рассматривалось общее энергопотребление на молокозаводах [4.30] и на установках по затариванию [4.21] в Великобритании и в США [4.11]. В гл. 7 рассмотрен ряд вопросов, касающихся использования пластинчатых теплообменников при пастеризации.

Здесь внимание будет сосредоточено главным образом на процессе мытья бутылок, где можно получить экономию энергии. (Типы машин, применяемых для мытья бутылок из-под молока, те же, что и для пивоваренной промышленности и для производств безалкогольных напитков). Машины, работающие по такому же принципу, используются и в ряде других отраслей, включая производство деталей двигателей и мытье посуды.

Работа установок для мытья бутылок. На моечной установке может обрабатываться несколько десятков тысяч бутылок в час. Бутылки проходят ряд стадий (рис. 4.19) обработки водой или раствором моющих веществ. Способ обработки зависит от типа бутылок и их назначения; в настоящее время имеются установки, на которых бутылки оmyваются горячим раствором моющего вещества, прогреваются (для удаления этикетки) или одновременно оmyваются и прогреваются. В молочной промышленности в большинстве моечных установок используются системы форсунок под высоким давлением; бутылки оmyваются с внешней и с внутренней сторон водой и моющим раствором. Теплота к воде и детергенту поступает от паровых змеевиков, погруженных в баки.

Для эффективной очистки бутылок их подвергают воздействию относительно высокой температуры (около 70—80 °С). Так как бутылки поступают в установку обычно при температуре окружающей среды, а для пастеризованного молока они должны быть холодными при вводе в разливочную машину, расположенную вблизи моечной, нагрев и охлаждение осуществляются в несколько стадий. Предварительная промывка проводится простой теплой водой, которая удаляет основное загрязнение, затем бутылки поступают под струей моющего раствора. Бутылки моются под струей при постепенно увеличивающейся температуре вплоть до максимальной, а затем медленно охлаждаются. После окончательной промывки свежей водопроводной водой бутылки доводятся до температуры окружающей среды (10 °С). Процесс мойки бутылок занимает 3—4 мин, тогда как заполнение — 8 ч на молокозаводе и 20 ч на пивоваренном заводе и заводе безалкогольных напитков — 4 ч оставляют на очистку и ремонт оборудования.

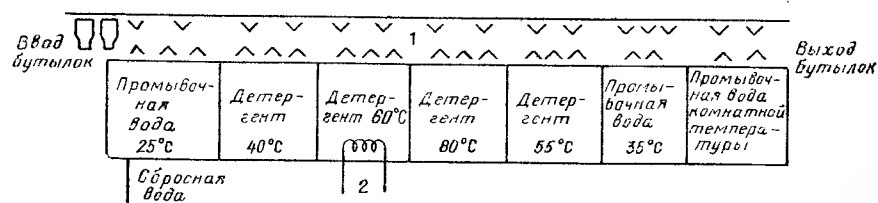


Рис. 4.12. Схема установки для мытья бутылок:

1 — струйные форсунки; 2 — змеевик

Чтобы поддержать температуру воды и моющего раствора на необходимом уровне, требуется значительное количество пара (обычно свыше 500 т/ч) в зависимости от мощности моечной установки. Сильно загрязненные потоки воды после промывки отводятся прямо в канализацию (до 10 тыс. л/ч при температуре 20—30 °С). Тепломассообмен в пределах самой установки достаточно сложный. Большие количества теплоты, аккумулируемые бутылками и конвейером, выводятся из одной секции промывки в другую. В конечном счете эта теплота падает в секции охлаждения и конечной промывки водой.

В настоящее время за счет совершенствования тепловой схемы на этих установках экономят некоторое количество воды и энергии. Например, конечная промывочная вода, нагретая частично при контакте с бутылками, используется для теплой промывки и затем проходит через теплообменник, размещенный в одном из баков с моющим раствором. Далее до вывода в сток часть ее добавляют в воду для предварительной промывки.

Существенное количество теплоты, подведенной к установке этого типа, теряется за счет излучения и конвекции. При стоимости пара приблизительно 2,5—3,0 ф. ст/кг и воды 13 пенсов за 1000 л утилизация теплоты и воды может дать большую экономию. По расчетам за счет мероприятий по уменьшению сброса воды можно сэкономить 7 пенсов на 1000 л воды, используемой в моечной машине.

Утилизация теплоты и воды в моечных установках. Так как при мойке бутылок последовательно осуществляются нагрев и охлаждение,

то экономия энергии может осуществляться, с одной стороны, за счет улучшения тары, в данном случае бутылок, чтобы тратить на их обработку меньше энергии, а другой — применением утилизационных систем.

Что касается первого способа, то желательно снизить массу бутылок, для экономии стекла и соответственно затрат энергии на производство бутылок. Снижение массы бутылок для мойки приводит к снижению количества теплоты, необходимой для увеличения температуры бутылок до значений, соответствующих удовлетворительной обработке, и соответственно количества воды, необходимой для их последующего охлаждения.

Более существенной и быстро окупаемой мерой по экономии энергии является установка тепло- и водоутилизационных систем. Как уже рассматривалось выше, на большинстве современных моечных машин устанавливается ряд теплообменников для утилизации и перераспределения теплоты.

Установлено, что в моечных установках может быть использован тепловой насос. Тепловые насосы обычно применяют именно в такой сфере, где имеется несколько источников низкопотенциальной теплоты и высокопотенциальных тепловых потоков.

Система с электрическим тепловым насосом. Упрощенная схема тепло- и водоутилизационной установки приводится на рис. 4.13. Моечная машина для бутылок имеет такой же температурный график, как и установка, показанная на рис. 4.12.

Для утилизации теплоты из бака с моющим раствором на конечной стадии используется обычный теплообменник; эта теплота используется для повышения температуры воды для предварительной мойки. Для предварительной мойки используется также часть воды из бака окончательной мойки (30 °С), а также вода, которая переливается из бака с моющим раствором на конечной стадии (45 °С). При этом используется система фильтрации добавляемой воды для предварительной мойки.

После использования некоторого количества теплоты моющего раствора на конечной стадии для нагрева воды на стадии предварительной мойки моющий раствор проходит через испаритель теплового насоса, прежде чем снова возвратится на стадию окончательной мойки и в баки при температуре 30 °С. Часть этого потока отбирается, фильтруется и охлаждается до 12—15 °С во втором испарителе и затем используется для окончательной мойки.

Образовавшиеся за счет утилизированной в испарителях теплоты пары хладагента сжимаются в компрессоре и направляются при более высокой температуре в конденсатор для нагрева воды из первого бака с моющим раствором с 55 до 65 °С, а также во второй конденсатор, где вода, предназначенная для высокотемпературной стадии, нагревается с 65 до 80 °С. На стадии предварительной мойки добавляется необходимое количество химически очищенной воды.

На моечной машине производительностью 30 тыс. бутылок в час, потребляющей при обычном нагреве и обычном расходе воды 13 600 л воды и 2,2 ГДж теплоты в час, применение теплового насоса и филь-

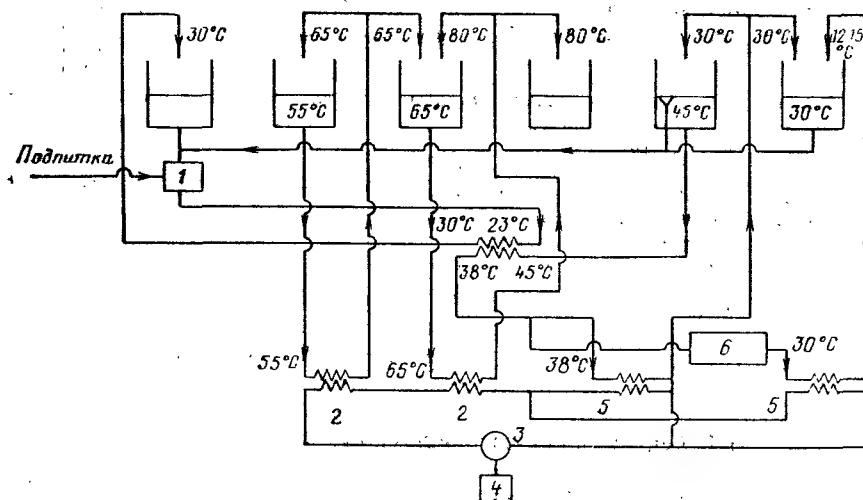


Рис. 4.13. Схема тепло- и водоутилизационной установки с тепловым насосом для мойки посуды, разработанной фирмой Milpro NV:

1 — фильтр; 2 — конденсатор; 3 — компрессор; 4 — двигатель; 5 — испаритель; 6 — фильтры

травальной системы может снизить расход энергии до 0,25 ГДж/ч а расход воды — до 2600 л/ч. Период окупаемости такой установки — от 2 до 3 лет.

Такая же возможность по утилизации теплоты и воды существует и для других технологических процессов в молочной промышленности, а также на пивоваренных заводах или других производствах, где осуществляется затаривание в бутылки.

Холодильная установка также может рассматриваться как источник теплоты, и поэтому имеется возможность применить здесь тепловой насос; в этом случае холодильная установка может быть источником теплоты для испарителя теплового насоса или источником теплоты конденсатора в холодильном цикле.

Использование теплового насоса в установке для мойки тарелок. В этом случае вода для мойки нагревается до 90 °С, т. е. несколько выше, чем для мойки бутылок. Сбросная теплота в виде пара используется как источник теплоты в теплонасосной системе. Использование теплоты этого пара наряду с экономией энергии улучшает комфортные условия работы персонала.

Ниже приводятся сравнительные данные обычной установки и с тепловым насосом с коэффициентом преобразования $\phi = 4$ и температурой воды на выходе 60 °С:

Обычная установка	
Мощность, кВт, подводимая:	
к двигателям	5,5
к калориферу	67,0
к баку для нагрева воды	54,0
Мощность, кВт, отводимая:	

с рассеиваемой теплотой	5,5
с теплотой сбрасываемой воды	26,5
с теплотой тарелок	41,5
с парами	53,0

Установка с тепловым насосом

Мощность, кВт, подводимая:	
к двигателям	5,5
к мойке на конечной стадии	25
к теплонасосному компрессору	24
Мощность, кВт, отводимая:	
с рассеиваемой теплотой	5,5
с теплотой сбрасываемой воды	26,5
с теплотой тарелок	22,5
с утилизируемой теплотой	96

Капиталовложения в эту установку окупаются через 31 мес.

4.4. Текстильная промышленность

В текстильной промышленности есть ряд процессов, которые значительно отличаются друг от друга на первых стадиях, а на стадиях обработки почти одинаковы (например, производство синтетических, шерстяных и хлопчатобумажных тканей). При этом наибольшими являются расходы на обработку (крашение, сушку и нанесение рисунков по трафарету), основную часть которых составляют расходы на энергию. В этом параграфе основное внимание уделяется процессам обработки, поскольку здесь используется оборудование, применяемое в ряде отраслей, а именно сушилки. При крашении потребляется большое количество горячей воды, и установленное здесь утилизационное оборудование может быть также применено в других отраслях или в других цехах завода.

Процессы крашения. Утилизация теплоты из стоков ванн для крашения и других подобных установок в текстильной промышленности стала весьма популярной. Еще имеются случаи, когда теплота и, что не менее важно, отработанная вода в значительных количествах сбрасываются, несмотря на то что в процесс окраски уже внедрен ряд энергосберегающих мероприятий.

Процесс крашения не должен рассматриваться в отрыве от процессов в других цехах завода. Сбросная теплота из сушилок, сушильно-ширильных и моечных машин также может использоваться для нагрева воды при крашении, если она не возвращается назад в сушилку. Одно из предложений в этой области [4.23] состоит в утилизации теплоты кипящих стоков из моечной машины для нагрева питательной воды котла. В случаях, когда нужно осуществить быстрый нагрев, т. е. когда пар непосредственно вводится в жидкость, необходимо осуществлять контроль за тем, чтобы весь пар сконденсировался, прежде чем достигнет поверхности жидкости.

Можно сэкономить около 9 тыс. кг пара в сутки в результате использования теплоты сбросной воды процесса окраски (9 тыс. л в сутки) при условии, что ее температура будет снижена до 38 °С. За год это дает экономию приблизительно в 6 тыс. ф. ст. В данном случае

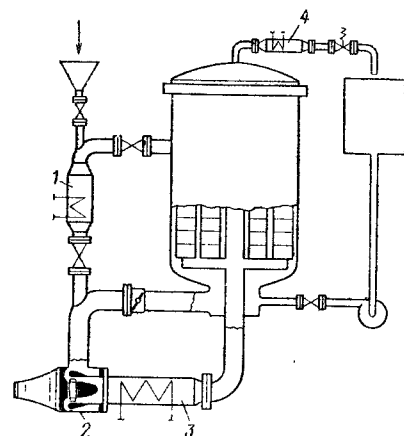


Рис. 4.14. Машина для крашения паковки с утилизацией сбросной теплоты сточных вод:

1 — емкость красителей под давлением; 2 — турбонасос; 3 и 4 — теплообменники

могут использоваться простейшие типы теплообменников, хотя нужно обратить внимание на выбор материалов, стойких к коррозии. Обычным компонентом в сбросной воде при крашении является волокнистое вещество, и поэтому необходима фильтрация перед теплообменником, чтобы исключить его забивание, которое снижает со временем эффективность теплопередачи.

Значительный интерес в текстильной промышленности представляет вопрос ускорения процессов крашения [4.25]. Большинство методов сводится к внедрению тщательного контроля за процессом в сочетании с точным знанием характеристик (массы и содержания влаги) каждой партии пряжи, поступающей на окраску. Для этого следует применять вычислительную технику.

Большие возможности экономии энергии имеются в процессе окраски паковки.

На рис. 4.14 показана усовершенствованная установка для крашения паковки. Этот агрегат отличается от стандартных моделей тем, что краситель вводят только после того, как достигнута максимальная температура крашения. При применении этого устройства исключается регулируемая стадия нагрева, сокращается цикл и период крашения. При этом требуется меньше теплоты, максимальная потребность в теплоте также снижается и уменьшается расход раствора по сравнению с обычными машинами для крашения паковки под давлением. Краситель нагревается до нужной температуры в емкости под давлением 1 и с помощью турбонасоса 2 быстро и равномерно распределяется в резервуаре для крашения. Два теплообменника 3 и 4 предназначены для использования сбросной теплоты.

Затем идет набивка рисунка на ткань, где во время процесса фиксации температура достигает 180°C , особенно для синтетических тканей, тканей из полиэфира и хлопка. Обычно в этом процессе в качестве нагревательной среды применяется перегретый пар. В ФРГ проведены исследования, которые показали, что стандартная система с рабочей шириной 2,6 м и пропускной способностью 200 м ткани с наружным нагревом фиксатора потребляет 1700 кг пара в час. В пересчете на стоимость пара в ФРГ около 4,75 ф. ст. за 1000 кг пара в час. В пересчете на стоимость пара в ФРГ около 4,75 ф. ст. с учетом двух рабочих смен в сутки. Универсальная машина такой же производительности с нагревом непосредственно в машине будет расходовать 560 кг пара в час, а эксплуатационные расходы составят 7 тыс. ф. ст. в год. Хотя этот тип оборудования более дорогой, но период окупаемости всего 1—1,5 года. При этом можно также некоторое количество пара для нагрева заменить горячим воздухом без влияния на качество набивки, если использовать хорошие красители. Расход пара в данном случае снижается более чем на 65%, а годовые эксплуатационные расходы — до 2,5 тыс. ф. ст. [4.27].

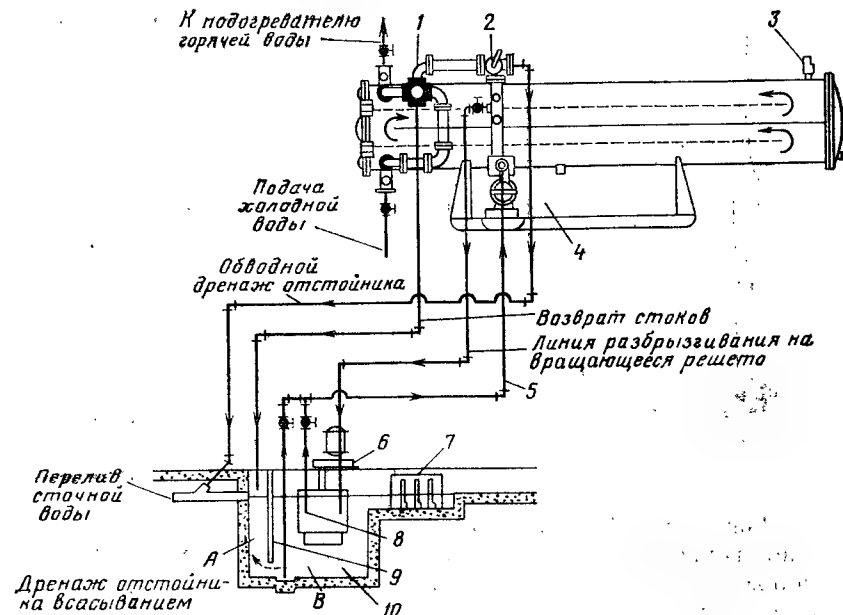


Рис. 4.15. Установка по утилизации теплоты сточных вод моечных машин:

1 — автоматический 4-ходовой обратный клапан; 2 — ручной 3-ходовой перепускной клапан; 3 — предохранительный клапан; 4 — насос подачи стоков из отстойника; 5 — всас насоса; 6 — вращающееся решето; 7 — решетчатый желоб; 8 — рабочий всас насоса; 9 — направляющая перегородка; 10 — отстойник

Процессы в текстильной промышленности, особенно процесс окраски, имеют много общего с процессами в прачечных, где также осуществляются меры по экономии теплоты и воды [4.28, 4.29, 4.30].

Источниками теплоты в прачечных, как и в текстильных производствах, могут быть сбросная вода систем кондиционирования воздуха ($0,9—1,5$ кВт на 1 кВт электрической мощности), теплота сточных вод при температуре 57°C , теплота мгновенного вскипания или горячего конденсата (если он не возвращается в котел) и выбросы из сушилок. (В последнем случае предпочтительнее использовать предварительно нагретый воздух для сушки, что будет рассмотрено ниже.)

Установка по утилизации сбросной теплоты сточных вод моечных цехов из отстойника приводится на рис. 4.15 [4.28].

Сточные воды моечных цехов направляются через входное решето в отстойник. Уровень воды в отстойнике поддерживается постоянным, излишки отводятся в канализацию. Основание сливной трубы должно находиться ниже уровня ввода сточной воды, чтобы обеспечить полный дренаж. Отстойник разделен на две части: горячую за входной решеткой В и холодную А для перелива в канализацию.

Перегородка, открытая снизу, обеспечивает уравнивание подруслового течения между двумя отделениями. Периодический слив

от моечных колес в горячую часть отстойника вытесняет равный объем холодной сточной воды под перемычкой и уходит далее через линию перелива в канализацию. В качестве теплоутилизационной установки здесь используется специальный многоступенчатый кожухотрубчатый теплообменник. Сточная вода насосом подается через прямые трубы, а свежая вода проходит через цилиндрический кожух с перегородкой вокруг труб.

На рис. 4.16 приводится система, которая используется в прачечных [4.30] для обеспечения потребности в горячей воде таких периодических процессов, как стирка. Она позволяет получить значительно экономию первичной энергии.

Регулировкой вентиляции поток воды, проходящий через нагреватель, поддерживается постоянным независимо от нагрузки. Излишнее количество направляется в бак-аккумулятор. Нагретая вода хранится в баках-аккумуляторах и подается при необходимости прямо в трубопровод горячей воды из нагревателя. Для подпитки в бак-аккумулятор вводят холодную воду, которая смешивается с потоком горячей воды, возвращаемой из нагревателя.

Сушка на текстильной фабрике. Сейчас становится все более очевидным, что использование теплоты для испарения воды как средства для сушки волокна — очень дорогой процесс, поэтому на действующих производствах следует использовать для этих целей сбросную теплоту в сочетании с предварительной механической обработкой. Большое значение имеет также тщательный контроль за сушкой: измерение температуры и влажности.

Широко распространена контактная сушка, где испарение влаги из тканей происходит за счет теплоты, проходящей через стенки ци-

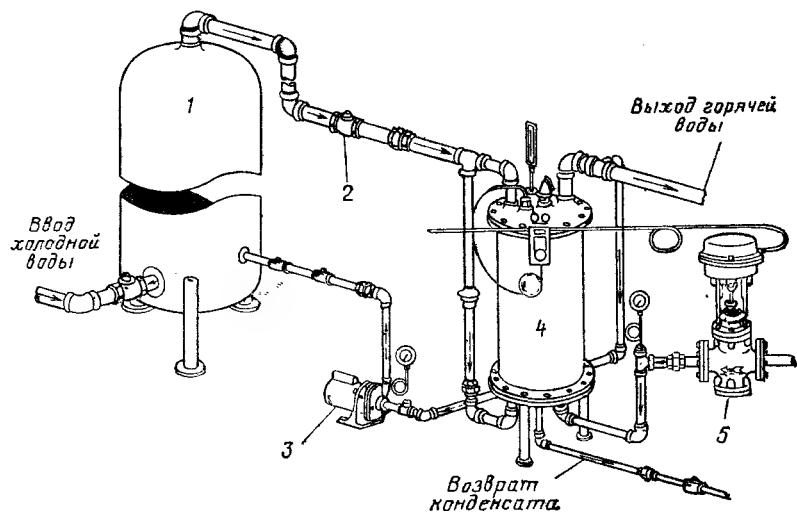


Рис. 4.16. Система нагрева горячей воды, обеспечивающая оптимальное использование энергии в прачечных:
1 — бак-аккумулятор; 2 — регулировочный вентиль; 3 — насос рециркуляции; 4 — теплообменник; 5 — парораспределительный клапан

линдров, которые изнутри нагреваются паром. Равномерное распределение теплоты зависит от быстрого удаления конденсата, причем максимальная конденсация происходит в первых двух (из трех) цилиндрах. Потери теплоты с концов цилиндров и линий подачи сводятся до минимума теплоизоляцией. Что касается сушки бумаги, то дополнительный нагрев принудительным потоком воздуха, подаваемого на верхнюю часть бумаги, способствует удалению влажного воздуха и ускоряет сушку.

Кроме возвращения конденсата в котел возможности прямой утилизации теплоты в цилиндрических сушилках не столь велики, как в сушильно-ширильных машинах, где применяется нагретый паром воздух. Использование рециркуляции и заслонок [4.23] может значительно повлиять на расход энергии. В некоторых сушилках за счет периодического отключения можно получить экономию электроэнергии вентилятора для удаления газов. Очень важно, чтобы влага из отработанного воздуха не попала в приточный воздух. Поэтому теплообменник для утилизации теплоты должен быть рекуперативного типа, где потоки нагреваемого и охлаждаемого воздуха надежно разделены. Установка типа экономайзера обходится недорого. Она имеет КПД до 50% [4.22] и охлаждает в 1 с 4,7 м³ отработанного воздуха со 175 до 90 °С, увеличивая одновременно температуру 3,25 м³/с свежего приточного воздуха с температуры окружающей среды до 90 °С. Количество утилизируемой при этом теплоты составляет около 1 ГДж/ч.

В США в процессах сушки текстильных изделий широко используются теплообменники с тепловыми трубами. Большую выгоду дает их применение в сушильно-ширильных машинах вместе с электростатическими фильтрами. Последние предназначены для сведения до минимума загрязнения уходящих газов волокнистыми веществами. Фирма Spierman Industries считает, что экономия при этом составляет от 2 до 1,6 тыс. ф. ст. в год соответственно для установок производительностью 2 и 9,9 м³ воздуха в секунду. Период окупаемости сравнительно мал.

Горячий воздух, выходящий из сушильно-ширильных машин и используемый для технологической обработки синтетических волокон, может содержать органические вещества, которые являются источником загрязнения атмосферы. В [4.22] сообщается об интересном применении каталитического горения паров выбросов из сушильно-ширильных машин, которое восстанавливает примеси до диоксида углерода и воды. Чтобы поддерживать реакцию, температура выбросов должна быть повышена до 360—380 °С, что достигается с помощью каталитической горелки. В приведенном примере для увеличения температуры выбросов до их соприкосновения с катализатором используется нефтяная горелка.

Если относительная влажность отработанного воздуха — на допустимо низком уровне, то можно использовать либо регенератор, если воздух сухой, либо рекуператоры указанного выше типа, причем эффективность утилизации составит 70%.

На рис. 4.17 приводится двухстадийная каталитическая установка фирмы Engelhard, применяемая для очистки сбросных газов азотно-

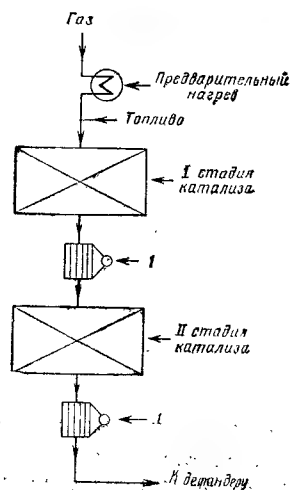


Рис. 4.17. Пример утилизации теплоты после каталитической реакции:
I — котел-утилизатор

кислотного производства, в которой каталитическая реакция проходит при температуре 800 °С. Как видно из рисунка, теплота газов после отдельных стадий катализа используется в котлах-утилизаторах.

В программе по экономии энергии в текстильной промышленности Великобритании предусматривается:

разработка установки для автоматизированного растворения, которая может дать большие количества раствора карбоната натрия с использованием при этом холодной воды. В применяемых ранее установках расходовался пар;

усовершенствование установок по очистке загрязненной шерсти с целью снижения расхода горячей воды на 50%;

установка системы управления процессом сушки неплотной шерсти для снижения потерь теплоты;

разработка системы управления поступлением ткани для снижения расхода теплоты в сушилках;

внедрение методов обработки стоков для вторичного их использования;

внедрение установок и мгновенного вскипания для утилизации теплоты с периодом окупаемости 1 год;

усовершенствование радиочастотных сушилок паковки со снижением стоимости сушки на 30%.

В некоторых исследованиях [4.31] приводятся также рекомендации и классификация мер по экономии энергии в текстильной промышленности (на 100 кг ткани):

Меры	Экономия, МДж**
<i>Технологические процессы с применением воды</i>	
Исключение недогрузки*	—
Вторичное использование горячей воды	1,88
Использование противотока	1,36
Ограничение потерь при холостом ходе	0,94
Уменьшение количества промывочной воды	1,36
Снижение температуры воды	0,94
Утилизация теплоты	(35)***
<i>Процессы сушки и нагрева</i>	
Максимальное использование механической сушки	0,21
Исключение пересушки	0,46
Снижение до минимума времени нанесения и фиксации красителя	0,21
Уменьшение количества отработанного воздуха до возможного минимума. Регулирование влажности в процессах сушки	(25)**
Исследование тепловой эффективности систем принудительной	

конвекции* ⁵	—
Уменьшение потерь при холостом ходе, например отключением оборудования	0,46
Утилизация теплоты отработанного воздуха	(25)**

* Пропорционально загрузке.
** В скобках — в процентах.
*** Процент общего количества теплоты.
** Процент общей экономии.
*⁵ Низкая.

Глава 5

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ

5.1. Кондиционирование воздуха

Кондиционирование воздуха, применяемое в промышленных и торговых помещениях, предназначено для поддержания температуры и влажности воздуха на определенном уровне. Во многих случаях поддержание комфортных условий необходимо для работающего персонала, но в целом ряде случаев они определяются также тем, что технологические процессы на заводе требуют определенного уровня температур и влажности. Система кондиционирования воздуха должна обеспечивать сложный энергобаланс внутри здания (рис. 5.1). Если эта система плохо спроектирована или работает неэффективно, то энергобаланс может легко нарушиться и образующиеся потери энергии окажут значительное влияние на уровень эксплуатационных расходов. Если становится очевидным, что применение кондиционирования воздуха в административном здании или на заводе зимой обходится очень дорого, то использование этой же системы для создания комфортных условий летом также приведет к значительным расходам энергии.

Можно многое сделать по ограничению потребности в энергии в здании путем тщательного его проектирования. Сама структура здания может оказывать значительное влияние на сезонные изменения температуры. Увеличивая количества аккумулируемой теплоты в здании, можно уменьшить сезонные колебания температуры. Этого можно достичь путем применения специальных конструкций стен или аккумуляторов теплоты, расположенных в здании. В существующих зданиях могут эффективно использоваться экранные отражатели солнца. Солнечное излучение в летние месяцы является источником значительной нагрузки для систем кондиционирования воздуха, и солнечный свет также создает некомфортные рабочие условия. В настоящее время имеются покрытия для окон в виде адгезионной пленки, которая может пропускать видимое излучение с очень небольшими потерями, но отражать инфракрасные лучи. С помощью одной из таких пленок нагрев помещения солнцем можно снижать в течение лета на 75%. Используются также такие пленочные материалы, как алюминий, оксид индия и оксид цинка. С помощью этих пленок можно регулировать приток теплоты в систему кондиционирования воздуха. Значительное влияние на теплопроводность окон имеют различные ком-

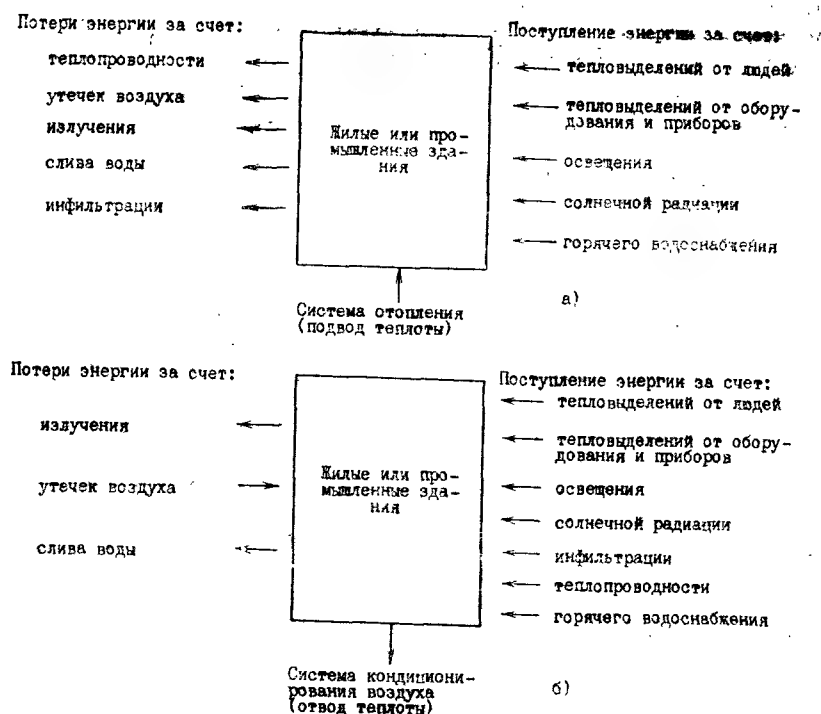


Рис. 5.1. Тепловой баланс системы кондиционирования воздуха зимой (а) и летом (б)

бинации двойного остекления, введение между двух слоев стекла газов с низким коэффициентом теплопроводности, а также применение покрытий с низкой пропускной способностью излучения:

Тип остекления	Теплопроводность, кДж/(м ² ·ч·°С)
Одноразное стекло	21
Двойное стекло с воздухом	11
Двойное стекло с одним покрытием	6,8
Двойное стекло с одним покрытием и криптоновым газом	3,8
Двойное стекло с двумя покрытиями и криптоновым газом	3,3
Одноразное стекло с одним покрытием	11,0

Очевидно, что когда в здании устанавливается система кондиционирования воздуха, следует исследовать и сбалансировать тепловые нагрузки. Однако нагрузка может изменяться с изменением условий в здании, и поэтому такие работы должны осуществляться регулярно. Для этой цели имеется широкий набор точных приборов для измерения потоков воздуха, его скорости и перепада давления. Одним из важных элементов системы кондиционирования является фильтрация. Загрязнение фильтров ведет к дополнительным сопротивлениям и соот-

ветственно к увеличению расхода электроэнергии вентиляторами. Производители кондиционеров снабжают их запасными фильтрами для замены вышедших из строя. Необходимо отметить, что в настоящее время разрабатываются фильтры нового типа, рассчитанные на длительный срок службы. Имеются также фильтры, которые можно устанавливать в вентиляционных системах кондиционирования для удаления примесей, большинство из этих фильтров работают на электростатическом принципе.

Не менее важными являются очистка поверхностей нагрева и охлаждения системы с целью увеличения коэффициента теплопередачи, что непосредственно отражается на эксплуатационных расходах и эффективности использования энергии. Большую экономию дает изоляция вентиляционных систем. Если вентиляционные трубы соединяют пролеты между зданиями или если они проходят через марши здания, в которых не предусмотрено кондиционирование, могут иметь место потери теплоты или нагрев воздуха, и поэтому именно здесь должна быть осуществлена хорошая изоляция.

В некоторых случаях для экономии энергии целесообразно изменение влажности, а не регулирование температуры, в особенности тогда, когда нужна небольшая коррекция, чтобы обеспечить комфортные условия.

Системы кондиционирования воздуха в настоящее время чаще используются вместе с теплоутилизационной установкой, которая предусматривается уже при проектировании здания. Такие системы приводятся в гл. 6, а типы теплоутилизационных установок, которые используются в зданиях, описаны в гл. 7.

5.2. Автоматическое регулирование в системах кондиционирования воздуха

Автоматическое регулирование в системах кондиционирования воздуха очень важно как для обеспечения соответствующих комфортных условий, так и для эффективного использования энергии во всем здании.

Одним из недостатков применяемого в системах кондиционирования регулирования является его неспособность быстро реагировать на изменение внешних условий. Однако в настоящее время имеется целый ряд быстродействующих систем регулирования, которые могут свести до минимума потери энергии при перегреве или переохлаждении в зависимости от изменений внешних условий.

Включением или выключением оборудования по желанию людей, находящихся в здании, можно экономить энергию. Широко применяются в настоящее время системы автоматического регулирования, с помощью которых нагрузка на систему кондиционирования ночью и в выходные дни снижается. Если нагрузка на систему кондиционирования воздуха во время отопительного сезона в непииковый период снижается, очень важно держать заслонку воздушной вентиляции закрытой как можно дольше в соответствии с минимальными потребностями в вентиляции. Это же следует помнить и при повторном пуске

системы. При таких обстоятельствах нормальные комфортные условия в здании быстро восстанавливаются. К концу рабочего дня заслонки и вытяжные каналы должны снова закрываться, чтобы «сохранить» теплоту уже внутри здания. Во многих случаях можно достичь приемлемого уровня вентиляции, если заслонки на внешнем канале приточного воздуха частично закрывать каждый час в течение пикового периода графика нагрузки.

На оборудовании с системами распределения воздуха под низким давлением можно использовать систему регулирования для циклической работы установки со 100%-ным возвратом воздуха, поддерживая одновременно более низкие температуры воздуха в непииковые периоды.

Когда в здании нет людей, в высокоскоростной системе распределения воздуха вытяжные каналы должны быть закрыты, а поступление свежего воздуха и степень нагрева должны снижаться. На большом числе установок приточного воздуха для систем кондиционирования применяются регуляторы смещения воздуха, где теплый воздух из здания смешивается с холодным внешним воздухом до получения необходимой температуры приточного воздуха.

Ниже приводятся основные мероприятия по экономии энергии в правительственных зданиях Великобритании:

- эксплуатация котельных установок при оптимальном КПД;
- уменьшение количества пусков котлов;
- контроль за режимом пуска;
- установка средств контроля за отоплением;
- регулировка имеющихся средств контроля за отоплением;
- повышение коэффициента мощности;
- снижение избытка освещенности;
- улучшение теплоизоляции и температурный контроль;
- контроль за эксплуатацией вспомогательного оборудования.

Экономия за счет внедрения данных мероприятий оценивается в 2—25% потребления энергии для целей отопления и кондиционирования воздуха в правительственных зданиях при небольших в сравнении с экономией капитальных затратах. Срок окупаемости в среднем составляет не более 2 лет.

В результате пятилетней программы экономии потребление энергии и расходы снижаются на 30%.

Применение средств вычислительной техники в системах кондиционирования воздуха. ЭВМ могут применяться для исследования систем кондиционирования крупных зданий и определения основных мероприятий по экономии энергии, а также для целей регулирования.

Наиболее широкое применение нашли ЭВМ в США. Одна из программ, известная под названием Axxcess, составляет часть общей программы по энергии института Edison Electric Institute в Нью-Йорке. Она дает возможность потребителю определить пути наиболее эффективного использования электроэнергии в здании сравнением различных методов и систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха с учетом ряда факторов, оказывающих влияние на электрические нагрузки в системе. В программу входит также расчет капитальных и эксплуатационных расходов для каждого варианта. Имеется воз-

можность моделировать большинство типов современных систем кондиционирования воздуха с учетом утилизации сбросной теплоты потолочных индукционных нагревателей, работающих в часы провала электрической нагрузки и т. д.

Процедура применения такой компьютерной программы сводится к следующему [5.3]:

- изучение плана здания и анализ фактических условий;
- сбор данных для программы;
- вычисление нагрузки программ;
- вычисление данных по энергопотреблению;
- сопоставление этих данных с соответствующими нормативами;
- установление причин расхождения (например, утечка через заслонку, неправильная калибровка контрольно-измерительных приборов);
- разработка мероприятий по совершенствованию системы кондиционирования воздуха и определение капитальных и эксплуатационных расходов для каждого мероприятия;
- подготовка плана мероприятий на основе анализа.

Представляет интерес применение ЭВМ для регулирования отопления, вентиляции и системы кондиционирования воздуха в большом административном здании фирмы IBM в Чикаго. Оно 52-этажное, фундамент 38×64 м, объем $6,8 \cdot 10^6$ м³, площадь остекления 32 500 м².

По проектным данным расход воздуха на вентиляцию составляет 188 м³/ч, потери теплоты в режиме отопления 54 ГДж/ч при температуре 22 и 21° С соответственно снаружи и внутри здания. В режиме охлаждения поступление в здание теплоты составляет 63,8 кДж/ч. Температура по сухому термометру 35° С, по влажному 24° С при 25,5° С снаружи. Относительная влажность внутри здания 50%.

Общая мощность системы кондиционирования воздуха составляет 22,5 МВт, дополнительные нагрузки в здании еще 22 МВт. Было подсчитано, что в рассматриваемом административном здании затраты энергии на 1 м² в среднем на 42% меньше, чем в 13 обследованных крупных административных зданиях [5.4].

5.3. Котлы

Текущие ремонты, эффективная изоляция, ликвидация утечек и ряд других мер, не требующих, как правило, больших капиталовложений, могут дать значительную экономию энергии.

Экономия энергии может быть также достигнута за счет использования аккумуляторов, в которые горячая вода направляется в период снижения нагрузки котла. Очень важна очистка поверхностей нагрева, поскольку отклонение от оптимальных режимов горения может быть причиной образования нагаров и, следовательно, снижения степени нагрева. Необходимо отметить, что увлажнение воздуха, поступающего в котел для горения, способствует предотвращению загрязнений поверхностей нагрева котла. Обычно рекомендуется 12—20 кг воды на каждые 100 кг воздуха [5.5].

Утилизация теплоты уходящих газов котла может дать экономию 10% топлива даже при относительно низкой температуре выбросов.

Там, где это возможно, должен осуществляться возврат конденсата. Если это по каким-либо причинам нецелесообразно, то теплота конденсата должна утилизироваться до его сброса.

Продувочная вода котла является также источником сбросной теплоты, которая должна утилизироваться (гл. 6). Это наиболее экономично в тех случаях, когда питательная вода плохого качества и требуется частая продувка котла.

Если котел обеспечивает одновременно выработку технологического пара и пара для целей теплоснабжения, естественно, он работает при небольших нагрузках в летние месяцы, т. е. с относительно низким КПД. Оптимальный выбор котлов по количеству и производительности может дать экономию топлива.

В настоящее время имеется ряд приспособлений (некоторые из них подробно рассматриваются в гл. 8) для перекрытия газоходов котла в периоды отключения горелок, что позволяет аккумулировать теплоту в котле. В периоды отключения ночью или в выходные дни потери теплоты через газоход сводятся до минимума, что также экономит энергию. Применяемые приспособления (шибера) открывают или закрывают газоход автоматически в периоды работы или отключения горелки.

5.4. Дымовые трубы

Функции дымовой трубы — это, прежде всего вывод уходящих газов как можно выше в атмосферу и поддержание в котле необходимой скорости газа или тяги.

В системах естественной тяги, которые наиболее чувствительны к увеличению загрязнения, очень важно состояние внутренней поверхности верхней части дымовой трубы. При сильном ее загрязнении теряется свыше 50% полезной площади и тем самым ухудшается тяга. Поэтому нужна регулярная проверка состояния дымовых труб на заводе и очистка их по мере необходимости.

Увеличения тяги можно достичь увеличением высоты трубы. Лучшее всего это достигается в трубах, которые имеют относительно большую площадь поперечного сечения и низкие скорости газа, так как в противном случае может увеличиться перепад давления. Другим методом улучшения естественной тяги является установка барометрических регуляторов тяги, а также установка в верхней части трубы эжекторов.

Принудительная тяга осуществляется на больших по производительности установках или когда предполагается утилизация теплоты в газоходе, ведущая соответственно к увеличению сопротивления тракта.

Наиболее эффективной является комбинированная система естественной и принудительной тяги. Такие системы имеют температуры у основания дымовой трубы на 40% ниже, чем в системах с хорошей естественной тягой при пропорциональном снижении потерь теплоты с уходящими газами.

5.5. Системы сжигания топлива

КПД сжигания топлива — один из самых важных факторов в работе котлов, печей и ряда других нагревательных установок, в которых используется жидкое, твердое или газообразное топливо.

Мероприятия по совершенствованию действующих систем могут сводиться к замене горелки старого типа новой или к установке системы автоматического регулирования соотношения воздуха и топлива в зависимости от изменения нагрузки и внешних условий. Для анализа состава продуктов сгорания используются специальные приборы. Используя результаты этого анализа, можно улучшить процесс горения и, следовательно, получить экономию энергии. В котлах, печах и других установках большое значение имеет предотвращение повреждений воздухоподогревателей, экономайзеров и других теплообменных аппаратов.

Если причиной низкой эффективности процесса горения является плохое смешение, то желательно перейти с инжекционной горелки на горелку с принудительной подачей воздуха.

Как видно из рис. 5.2, существенное влияние на КПД процесса горения оказывает изменение вязкости топлива, связанное с отклонением его температуры от номинальной. Так, например, изменение температуры нефти на 5 °C снижает КПД горелки на 1—2%.

Имеется много типов горелок, предназначенных для различных целей и отличающихся формой и относительной длиной пламени. Одна из горелок сконструирована таким образом, чтобы газы омывали стенку печи.

Горелки такого типа применяются там, где необходимо хорошее распределение теплоты; в этом случае они располагаются вблизи от нагреваемого материала без опасности прямого воздействия пламени.

Картина распределения потоков горячего газа и пламени в горелке фирмы Stordy Hauck приводится на рис. 5.3. Эта горелка для высокотемпературного нагрева дает значительную экономию энергии. Она обеспечивает эффективную рециркуляцию газов в камере печи и интенсивную теплопередачу с помощью принудительной конвекции на всех стадиях цикла. Именно такая конструкция горелки разрывает слой неподвижного воздуха вокруг нагреваемого материала, что интенсифицирует нагрев. На рис. 5.4 приводится сравнение эффективности высокоскоростной горелки с эффективностью горелки стандартного типа.

Погруженные горелки еще мало известны [5.6], но их применение для нагрева технологических жидкостей может оказаться весьма эффективным. Агрегат для погруженного горения, разработанный фирмой Нудроtherm, приводится на рис. 5.5.

Горелка подобна радиантной трубе, которая погружена в нагреваемую жидкость. Газообразные продукты горения выводятся в жидкость через основание трубы. Горячие газы разбиваются на небольшие пузырьки, которые поднимаются между трубой горения и отсасывающей трубой. Это создает в пространстве между двумя трубами турбулентное движение и обеспечивает тем самым нормальную температуру стенок трубы горелки.

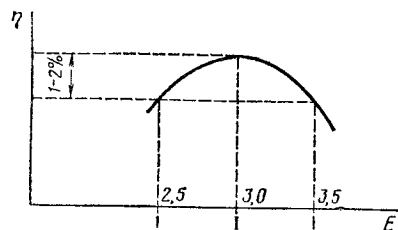


Рис. 5.2. Влияние вязкости жидкого топлива на показатели работы горелки

Образование пузырьков увеличивает эффективность теплообмена между газом и жидкостью. Эта система имеет и другие преимущества. Горение происходит только там, где оно необходимо, при этом не нужен теплообменник, в результате чего снижаются капитальные и эксплуатационные расходы.

Эти горелки широко используются на установках кислотного травления и позволяют повысить производительность и снизить расход топлива. Снижение расхода топлива связано с турбулентным движением, которое дает возможность вести травление при температуре на 10—15° С ниже, чем при обычном способе нагрева в травильных ваннах.

Особый интерес представляет рекуперативная горелка [5.8], которая подробно рассматривается в гл. 6.

Системы автоматического регулирования процесса горения представляют собой стандартное оборудование на большинстве новых печей. Как указывалось ранее, основной целью этих систем является обеспечение правильного соотношения воздуха и топлива в горелке. Правильное соотношение обеспечивает высокий КПД, поскольку предотвращаются потери теплоты с уходящими газами из-за высокого коэффициента избытка воздуха или потери с химическим недожогом из-за низкого коэффициента избытка воздуха. Системы регулирования необходимы также с точки зрения безопасности, так как избыточно обогащенная смесь может привести к взрыву. Процесс горения может также повлиять на качество продукта и ход всего технологического процесса.

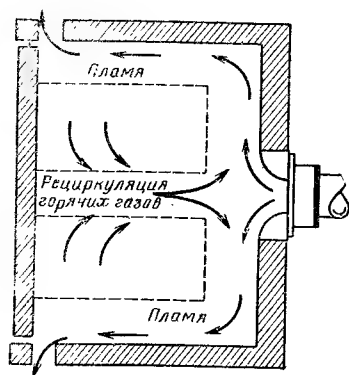


Рис. 5.3. Картина распределения потоков горячего газа и пламени горелки фирмы Stordy Hauck

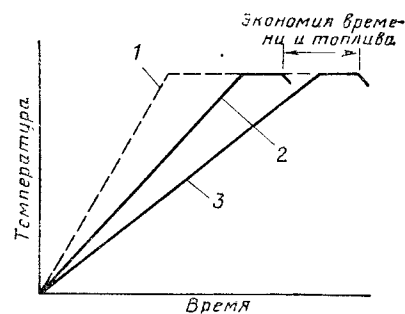


Рис. 5.4. Сравнение эффективности высокоскоростной горелки и горелки стандартного типа:

1 — температура в печи; 2 — температура нагреваемого материала при использовании высокоскоростной горелки; 3 — температура нагреваемого материала при использовании горелки стандартного типа

Точное регулирование необходимо и для тех процессов, когда требуется восстановительная газовая среда или обедненная среда для целей окисления. Для достижения хороших результатов иногда необходимо по мере хода процесса изменять газовую среду, что также требует применения системы автоматического регулирования. Непосредственным же результатом исключения обогащенных и обедненных смесей в ходе нормальной работы является снижение выбросов в атмосферу [5.9].

Многие методы регулирования процесса горения основаны на использовании электронно-вычислительных систем. Потоки топлива и воздуха балансируются с помощью ЭВМ и позволяют легко и точно осуществить корректировку по давлению, температуре и запрограммированной потребности в избытке воздуха. Такая система может использоваться для горелок, работающих на нефти или газе, в нее включены также расходомеры воздуха и топлива.

Система автоматического регулирования имеет следующие основные особенности:

при повышении нагрузки количество топлива начнет увеличиваться только тогда, когда под действием системы регулирования увеличится объем подаваемого в топку воздуха. Снижение нагрузки приведет к уменьшению объема подаваемого воздуха именно в тот момент, когда снижение количества топлива уже произошло;

при регулировании сдвига можно установить требуемый коэффициент избытка воздуха (в процентах) несмотря на изменение нагрузки.

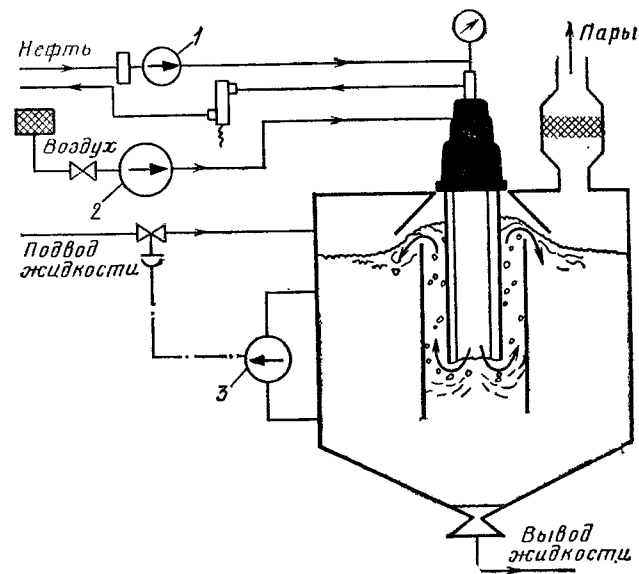


Рис. 5.5. Погруженная горелка:

1 — насос системы рециркуляции топлива; 2 — вентилятор; 3 — насос с рециркуляцией нагреваемой жидкости.

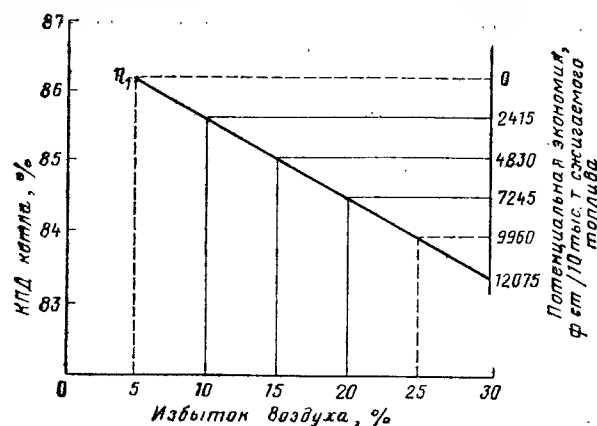


Рис. 5.6. Возможная экономия топлива при использовании систем регулирования избытка воздуха:

η — нормальное значение при эффективном процессе и хорошем регулировании

Регулирование наклона позволяет проводить автоматическое отклонение увеличения соотношения избытка воздуха, причем регулирования сдвига и наклона осуществляются без влияния друг на друга; сигналы, выходящие из системы, могут использоваться для приведения в действие пневматических и электрических систем регулирования;

система регулирования определяет отклонения в смеси, когда условия не соответствуют прогнозируемым, а с помощью расходомера непрерывно проверяется правильность протекания процесса.

Эффективность поддержания оптимальных соотношений воздуха и топлива с использованием системы регулирования показана на рис. 5.6.

5.6. Системы получения сжатого воздуха

Сжатый воздух часто используется на заводе, при этом в ряде случаев не учитывается, что это относительно дорогая форма энергии. Для привода компрессоров, вырабатывающих сжатый воздух, потребляется электроэнергия, а в некоторых случаях нефть или газовое топливо. Имеется ряд мер, позволяющих снизить эксплуатационные расходы в системах получения сжатого воздуха. Все утечки должны немедленно устраняться, а давление в системе должно быть настолько низким, насколько позволяют технические условия. Никогда не следует использовать сжатый воздух для охлаждения методом принудительной конвекции, для этого существуют более дешевые методы.

Теплоту, отведенную от холодильника после компрессора, можно использовать для целей отопления. Очень часто компрессор работает и тогда, когда нет надобности в сжатом воздухе, и, конечно, здесь на-

до учитывать, есть ли нужда в этом с учетом потребляемой электроэнергии и теплоты, необходимой для отопления.

Фильтры и сушилки являются составными элементами большинства систем получения сжатого воздуха, поэтому регулярная очистка или замена элементов фильтра должна быть частью программы ремонтных работ. Увеличение перепада давления из-за загрязненного фильтра приводит к увеличению затрат энергии на привод компрессора и т. д.

Из опыта фирм, специализирующихся на политетрафторэтиленовых покрытиях, можно понять, насколько важна сушка. Наличие пор в поверхностях, которые образуются из-за влаги в сжатом воздухе, используемом для распыскивания политетрафторэтилена, приводят к 5%-ному браку. Установка сушилок и фильтров снижает норму брака почти до нуля.

Привод компрессора газовым возвратно-поступательным двигателем дает возможность использовать сбросную теплоту для теплоснабжения или получения пара на технологические цели.

5.7. Градири

Основной функцией градири является охлаждение нагреваемой в процессе воды таким образом, чтобы она могла вторично использоваться для дальнейшего охлаждения, вместо того чтобы сбрасываться. В хорошей градири теряется только 5% воды при переносе и испарении.

С учетом экономии, которую дает градирия, — 10 пенсов на 1 тыс. л. — можно сказать, что она окупается в короткий срок. Тем не менее из градири сбрасывается теплота, что обусловлено принципом ее действия. Хотя эта теплота относительно низкопотенциальна, все же она представляет собой источник потенциальной экономии, если ее утилизировать путем прямого теплообмена либо с помощью теплового насоса (см. рис 7). Поэтому рекомендуется в тех случаях, когда воду подают в градирию при температуре выше 30°C, исследовать различные способы утилизации теплоты. Например, тепловой насос будет охлаждать ее, снижая, таким образом, нагрузку на градирию.

Нормальная работа градири зависит от состояния набивки, при этом рекомендуется заменять имеющуюся набивку новой, пластикового типа [5.12]. Это улучшит производительность и режим работы градири. Следует постоянно наблюдать за потерей воды, и для уменьшения ее можно использовать каплеотбойник. Любое повреждение в градири может повлиять на эффективность ее работы, и поэтому необходимо регулярно проводить профилактические ремонты.

Фирма ICI Petrochemical Division детально проанализировала энергобаланс завода, на котором имеется градирия.

Энергия, необходимая для циркуляционной системы, составляет 1/3 общего расхода энергии. Чтобы свести к минимуму количество холодной воды в таких системах, очень важно регулировать температуру охлаждающей воды на выходе. Фирма ICI установила регистраторы температуры, а на выходе охлаждающей воды из больших конденса-

торов и градиен — термостатически регулируемые вентили для автоматического регулирования потока.

На одном крупном заводе фирмы ICI имелись три отдельные циркуляционные системы охлаждающей воды, причем в каждой из них использовались насосы большой мощности без регулирования подачи. Объединив две системы и установив насос с переменной подачей, фирма значительно снизила расходы на перекачку. Относительно небольшие изменения потребности в охлаждающей воде осуществляются с помощью насоса с переменной подачей, а большие — включением или отключением насоса с постоянной подачей. Подсчитано, что такие меры позволяют получить экономию электрической мощности примерно 2 МВт.

5.8. Сушильные установки

Сушка является неотъемлемой частью большого числа промышленных процессов. В данном параграфе главным образом рассматривается сушка твердых продуктов, хотя в настоящее время имеется ряд сушилок для газов, например система кондиционирования воздуха.

Сушка твердых продуктов обычно связана с удалением воды, но в общем случае она предназначена для удаления любой жидкости. Удаление осуществляется или механически, например с помощью центрифуг, или термически, когда через осушаемую среду продувается горячий воздух. Возможности экономии энергии намного выше именно в процессах термосушки, и поэтому в книге в основном рассматриваются сушилки именно этого типа. (В пищевой промышленности применяется специальная сушка замораживанием, однако в других отраслях она не используется.)

Термическая сушка — прямая или косвенная, периодическая или непрерывная — считается эффективной только тогда, когда влагосодержание в продукте, выходящем из сушилки, снижается до необходимой степени. Необходимо строго соблюдать нормы влагосодержания. Так, недостаточная сушка, например, в текстильной промышленности вызывает плесень, которая может затруднять дальнейший процесс, а наличие влаги в измельченных рудах определяет прочность на раздавливание и влияет на размер окатыша.

Что касается экономии энергии, то важность процессов сушки трудно переоценить. Институт Sira в Великобритании учредил Центр по контролю и измерению влажности, который должен оказывать помощь промышленным объектам в применении контрольно-измерительных приборов для определения влажности непосредственно в технологических процессах производства продукции. Этот институт снабжает промышленные объекты гигрометрами и разработал методику измерения влагосодержания (относительной влажности продукта на выходе из сушилки). Кроме снижения расхода топлива применение контрольно-измерительных приборов повышает производительность установки, улучшает качество продукта и его однородность. Исключение пересушки может в большинстве случаев снизить расход топлива

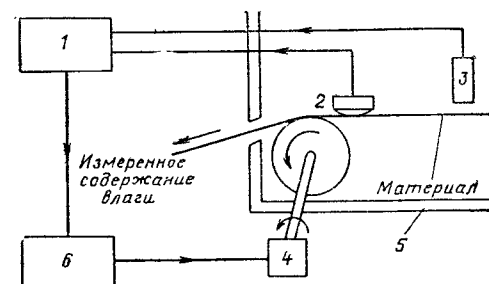
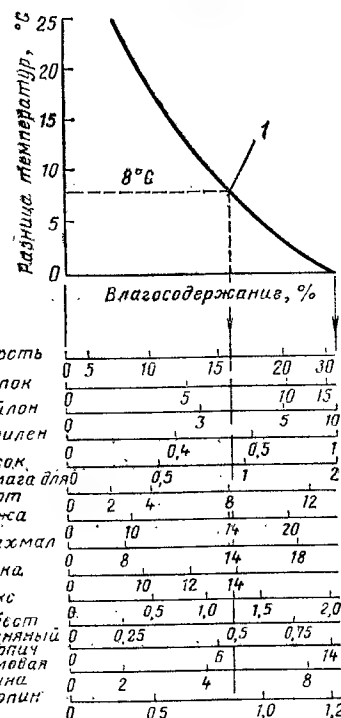


Рис. 5.7. Зависимость разности температур от влагосодержания для различных материалов

Рис. 5.8. Система регулирования влажности текстиля, разработанная институтом SIRA:

1 — процессор; 2 — датчик температуры материала; 3 — датчик температуры по влажному термометру; 4 — привод с регулируемым числом оборотов; 5 — сушильное устройство; 6 — система регулирования

минимум а 10%, а, например, в текстильной и фармацевтической промышленности — до 20%. В одном из производств исключение пересушки вдвое уменьшило затраты энергии на сушку.

Методика измерения влажности основана на том факте, что когда материал омывается сушильным агентом, то его температура ниже температуры сушильного агента по сухому термометру. В состоянии насыщения материала влагой его температура приблизительно равна температуре по влажному термометру. Если же влажность материала меньше критической, то его температура будет повышаться до температуры по сухому термометру. Разница температур между показаниями сухого и влажного термометров пропорциональна содержанию влаги в материале. Данный метод поэтому пригоден для измерения любого содержания влаги ниже точки насыщения. На рис. 5.7 приводится графическое изображение зависимости между влагосодержанием (в процентах) и разностью температур для различных высушиваемых материалов.

Для измерения двух температур необходимы устройства для измерения температуры высушиваемого материала и температуры внутри сушильной установки по влажному термометру.

Для непрерывных процессов эти измерения производятся на выходе из сушилки; система регулирования влажности, разработанная институтом Sira, приводится на рис. 5.8.

Ниже приводятся обоснования института Sira необходимости регулирования влажности осушаемых продуктов для ряда производств промышленности.

В текстильной промышленности недоосушка вызывает образование плесени и тем самым затрудняет ведение технологического процесса. Измерение влажности осуществляется по разности температур материала, при этом точность измерения зависит от волокна и составляет: для шерсти $\pm 2\%$, для хлопка $\pm 1\%$, для нейлона $\pm 0,5\%$, а регулирование осуществляется в результате изменения выхода ткани на ширинной машине. Экономия на одну сушилку составляет более 4 тыс. ф. ст. в год при периоде окупаемости капитальных вложений менее 12 мес.

В производстве керамической плитки нормативное содержание влаги определяет максимальную прочность плитки, соответственно снижается ее крошение и ломка и увеличивается производительность установки. Измерение влажности осуществляется прибором, устанавливаемым на конвейере, несущем комки глины, прибор определяет коэффициент отражения в инфракрасной области (точность измерения для глиняной пыли $\pm 16\%$, а для комков глины $\pm 57\%$). Нормативное содержание влаги поддерживается регулированием частоты вращения паровых барабанных сушилок.

Экономия средств по одной установке составляет 40 тыс. ф. ст. в год при периоде окупаемости капиталовложений 2 мес.

В производстве силикатно-кальцевого кирпича нормативное содержание влаги снижает разрушение, деформацию и вспучивание кирпича. Система регулирования фирмы Riedsdale Dietert обеспечивает поддержание нормативного содержания влаги с точностью $\pm 0,5\%$. В результате уменьшения брака экономится около 2 тыс. ф. ст., а повышения прочности на сжатие — 10 тыс. ф. ст. в год. Период окупаемости составляет около 2 мес.

В производстве концентратов железной и медной руды содержание влаги определяет прочность на раздавливание и влияет на размер окатышей. Измерение влажности осуществляется таким же образом, как и в производстве керамической плитки. Точность измерения составляет $\pm 0,3\%$.

В фармацевтической промышленности влажность влияет на прочность я цвет таблеток. Удовлетворительные результаты получены для сушилок с кипящим слоем, применяемых на заводе крахмально-лактозных веществ. В настоящее время они также применяются для регулирования процесса сушки таблеток с сахарной облаткой. Определение влажности основано на измерении разности температур. Точность измерения по предварительным данным составляет $\pm 0,16\%$. Экономия составляет 1 тыс. ф. ст. в год применительно к сушилке с кипящим слоем. Для специальных лекарств эта экономия значительно выше.

В мукомольной промышленности нормативное содержание влаги способствует оптимальной экстракции муки из зерен пшеницы. Точность измерения влажности на основе микроволновой абсорбции составляет $\pm 0,25\%$. Экстракция с применением автоматического регулирования в сравнении с установками, где она не применяется, увеличивает выход муки в зависимости от сорта пшеницы на 1—2,4%. Период окупаемости капиталовложений при этом составляет 4 мес.

Фирма National Asphalt Pavement Association NAPA (США) провела анализ методов экономии энергии и выдала полезные рекомендации для имеющихся сушильных установок [5.13, 5.14].

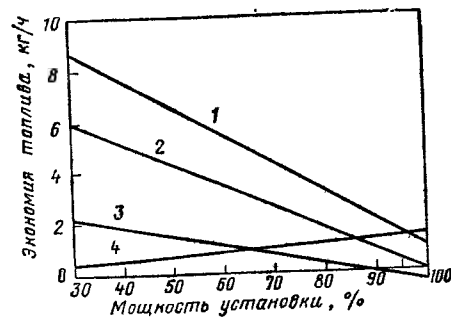
Особое значение имеют методы хранения материала до сушки. В сырой атмосфере рекомендуется, чтобы во время хранения материал был накрыт или хранился таким образом, чтобы происходила естественная сушка. Фирма NAPA подсчитала, что снижение содержания влаги в материале только на 1% до ввода в сушку экономит до 10% топлива, необходимого для самого сушильного устройства. Низкое содержание влаги на входе в сушилку уменьшает также расход электроэнергии для привода вентилятора, который удаляет испаряющуюся влагу и на долю которого приходится до 50% затрат энергии, включая и удаление газообразных продуктов горения. Фирма NAPA реко-

мендует в первую очередь отбирать продукт для сушки снаружи при хранении его штабелями. При отборе из глубины штабелей можно отобрать материал с наиболее высоким содержанием влаги, который еще не успел просохнуть естественным путем.

Расход топлива на сушку зависит от объема используемого воздуха, поскольку этот воздух нагревается и затем удаляется из сушильной камеры. Если сушилка работает с производительностью меньше максимальной или если влагосодержание продукта ниже средних значений, то горелку можно легко отрегулировать дросселем, но тогда регулирование потока воздуха через сушильную камеру будет за-

Рис. 5.9. Эффективность применения сушильной установки фирмы Stordy — Nauck:

1 — общая экономия топлива; 2 — экономия за счет поддержания минимального коэффициента избытка воздуха; 3 — экономия эквивалентного количества топлива за счет уменьшения расхода электроэнергии на привод вентилятора; 4 — экономия за счет снижения потерь с излучением



трудно. Регулировка демпфером может оказаться неточной, и утечка в камеру из других отверстий может привести к очень высокой нагрузке на вентилятор [5.15]. В других системах горения необходимо контролировать температуру уходящих газов, причем слишком высокая температура будет показателем недоиспользования теплоты. Следует отметить, что рекуперацию уходящей теплоты можно осуществлять на многих типах сушилок (гл. 6).

Фирма Stordy — Nauck разработала сушильную установку с рекуперативной камерой горения и регулированием соотношения между расходом топлива и воздуха. Наряду с уменьшением потерь теплоты с уходящими газами за счет поддержания минимального коэффициента избытка воздуха снижаются затраты электроэнергии на привод вентилятора и потери теплоты с излучением.

На рис. 5.9 приводятся данные по экономии топлива для сушильной установки производительностью 400 т/ч, влажность материала на выходе из сушилки 5%, а температура 150°C. Топливо — газ или нефть.

Фирма NAPA в результате исследования процесса горения в сушилке определила, что изоляция из огнеупорного кирпича позволит увеличить эффективность классических барабанных сушилок за счет увеличения температуры внутренней стенки и соответственно повышения степени радиационного и конвективного нагрева материала, снижения потерь теплоты через стенку сушилки.

В гл. 6 будут рассмотрены недавно разработанные методы сушки, новые установки для этих целей, а также дана оценка потенциальных возможностей применения утилизации сбросной теплоты — процессов сушки.

5.9. Печи

Печи — наиболее крупный потребитель энергии в промышленности, и поэтому здесь более чем где бы то ни было должна использоваться энергосберегающая техника.

Теплоутилизационные системы для печей привлекают наибольшее внимание. Они подробно будут рассмотрены в гл. 6. В данном параграфе достаточно отметить, что сбросная теплота может использоваться для многих целей, включая подогрев воздуха для горения, подогрев холодного сырья, выработку пара или горячей воды или нагрев жидкостей. Подсчитано, что только в Великобритании потери теплоты сбросных газов печей эквивалентны 100 млн. ф. ст. в год. Одним из методов экзотермии, менее дорогостоящим, чем применение теплоутилизационных установок, является изоляция агрегата. Потеря теплоты зависит от состояния футеровки печи, изоляции и печных дверей, поэтому необходим их регулярный ремонт. Наиболее важным вопросом в совершенствовании изоляции является разработка огнеупорных материалов с малыми значениями плотности и коэффициента теплопроводности. Так, например, эффективной является изоляция, состоящая из керамических волокон на основе оксида алюминия или оксида кремния. Она может быть в виде ваты, веревки и больших полотен. Эффективность этой изоляции такова, что слой толщиной 100 мм эквивалентен слою в 300 мм из шамотного кирпича, который подвергался спеканию с высоко- и низкотемпературным футеровочным кирпичом [5.19]. Некоторые виды изоляции из керамического волокна выдерживают температуру до 1600° С. Такие огнеупорные покрытия широко применяются на электропечах, особенно периодического действия. В сравнении с расходом энергии в печах с классической кирпичной футеровкой расход энергии в печах с новой футеровкой снижается на 50%, и такие же результаты получены на газовых печах. Фирма Steel Castings Research and Trade Ass (SCRATA) (Великобритания) значительно улучшила КПД одной из своих печей, используя такую футеровку из керамического волокна марки Kaowool. Время установки футеровки и ее стоимость были также значительно снижены путем установки этой футеровки непосредственно на имеющуюся обшивку из кирпичной кладки, что исключило, таким образом, необходимость применения в таких случаях стальной подпорки в виде оболочки. Установка такой футеровки на печи с выдвижным подом размером 4,6 × 3 м заняла 5 дней при общих расходах 2300 ф. ст. (1000 ф. ст. — стоимость материала плюс 1300 ф. ст. — расходы на установку).

Измерения расходов газа в режимах циклов термообработки до и после установки новой футеровки показали, что в печах с новой футеровкой экономия газа в среднем составляет 30%.

Перевод трех термических печей на новую футеровку дал экономию топлива, эквивалентную около 1 тыс. ф. ст./мес.

Фазы нагрева и охлаждения в различных циклах термообработки сильно сократились из-за низкой аккумулирующей способности футеровки.

Таблица 5.1. Сравнение результатов эксплуатации печи для обжига керамики с футеровкой из волокон Saffil и кирпича

Футеровка	Режим	Длительность про- цесса, ч			Футеровка	Режим	Длительность про- цесса, ч		
		Нагрев	Про- грева- ние	Охлаж- дение			Нагрев	Про- грева- ние	Охлаж- дение
Полая посуда					Плоская посуда				
Кирпич	1	15,5	1	11	Кирпич	1	18,5	3	11
Волокно	1а*	7,5	1	8	Волокно	3а	10,5	3	8
Кирпич	2	8,5	1	11	Кирпич	4	11	3	11
Волокно	2а*	7,5	1	8	Волокно	4а*	10,5	3	8

* При самом быстром нагреве изделия в печи остаются целыми.

Другим примером эффективной футеровки, применяемой для газовой печи на первой стадии обжига в керамической промышленности, является волокна Saffil (производитель — фирма ICI). В табл. 5.1 приводятся сравнение результатов эксплуатации этой печи с футеровкой из волокон Saffil с результатами эксплуатации такой же печи, футерованной кирпичом. Печь работает при температуре до 1250° С, она имеет внешний стальной кожух с размерами 4,54 × 3,18 × 3,02 м.

Правильный режим рабочих нагрузок печи снижает расход энергии на вторичный нагрев, но если печь имеет большие интервалы между загрузками, то температура в печи в этих интервалах должна поддерживаться минимальной. Кроме того, следует строго соблюдать режим предварительного нагрева печей, чтобы вести его не дольше, чем это требуется.

Регулирование давления в больших печах обеспечивает минимальный выход пламени и также препятствует присосам холодного воздуха через любые отверстия. Обычно в печи поддерживается небольшое положительное давление, а равномерное его распределение способствует даже интенсификации процесса нагрева.

Поддержание соответствующих параметров в печи и в других установках должно осуществляться с помощью контрольных диаграмм, представляющих собой зависимости КПД печи от избытка воздуха, температуры уходящих газов, тепловой нагрузки. С их помощью операторы могут быстро изменить объем воздуха на горение для получения максимально возможного КПД процесса. Такие диаграммы, применяемые фирмой ICI, приводятся на рис. 5.10 и 5.11 [5.20]; в большинстве случаев их применение позволяет увеличить КПД процесса на 5%. Наиболее очевидным показателем пережога является появление пламени в дымовой трубе. Дымовые трубы на многих печах имеют завышенный размер; это приводит к избыточной потере теплоты и невозможности герметизировать камеру без использования демпферов. Если печь большую часть года работает с нагрузкой ниже максимальной, то размер дымовой трубы, конечно, должен быть уменьшен. Окалина на поверхностях нагрева снижает КПД печи, поэтому необходим по-

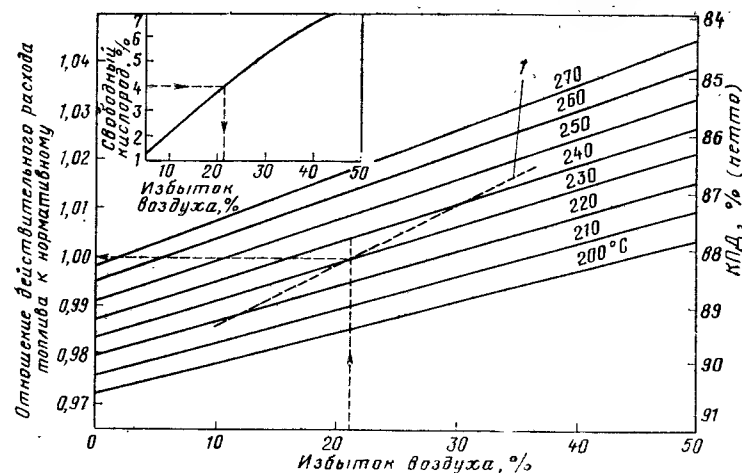


Рис. 5.10. Диаграмма режимов печи:

Цифры — температура уходящих газов. Тепловой КПД получен при условии, что остальные потери приняты за 1,5%; 1 — влияние избытка воздуха на температуру уходящих газов при фиксированной загрузке печи (показатель эффективности — отношение действительного расхода топлива к нормативному расходу)

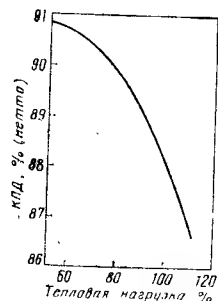


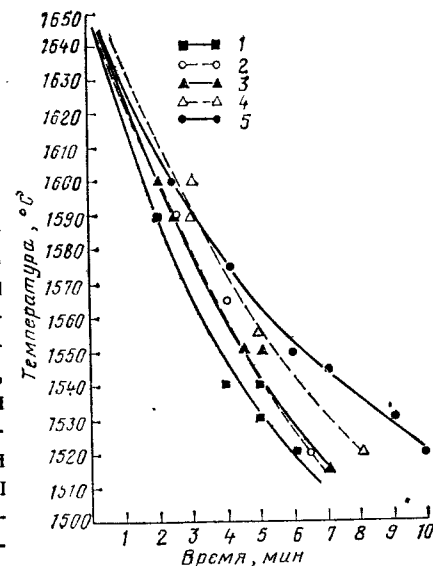
Рис. 5.11. Влияние тепловой нагрузки на тепловой КПД печи (нагрузка в процентах проектной)

стоянный контроль за процессом их окисления. При частных колебаниях температуры в печи срок ее службы, и главным образом срок службы огнеупорных частей, сокращается. Следует учитывать это обстоятельство и исследовать возможности изменения режима работы.

Источником потерь энергии может быть как сама печь, так и оборудование для загрузки и выгрузки камеры. Каркасы печи, которые чаще всего охлаждаются водой, могут действовать как поглотители существенного количества теплоты. Желательно изолировать их для предотвращения избыточного нагрева воды. Ленты конвейеров печей непрерывного действия и установок термообработки должны возвращаться в печную зону через нагретое пространство или предварительно нагреваться сбросными газами, чтобы не затрачивать дополнительную энергию для их вторичного нагрева. Например, фирма SCRATA изолирует ковши, предназначенные для переноса жидкого металла, с целью снижения потерь теплоты жидкого металла из-за радиации и конвекции с поверхности. Были проведены исследования с собственными материалами фирмы для покрытия ковша для индукционной печи массой 50 кг с расплавом стали, перегретым до температуры 1650 °С. Полученные кривые охлаждения (рис. 5.12) показывают, что

Рис. 5.12. Кривые охлаждения для 0,3%-ной углеродистой стали в индукционной печи с использованием различных покрытий ковша:

1 — без покрытия; 2 — шлак; 3 — вермикулит; 4 — экзотермическое покрытие марки KSR; 5 — покрытие марки KSR K-line A



все применяемые материалы снижают потерю теплоты, образуя пограничный слой, отделяющий металл от холодного воздуха. Среди испытанных материалов вермикулит и шлак расплавились, образуя шлакоподобный слой, и имели примерно одинаковые свойства, а наиболее эффективными оказались собственные материалы фирмы. Стоимость покрытий полностью компенсировалась стоимостью энергии для перегрева, необходимого для окончания или более длительной разливки стали.

5.10. Основные процессы нагрева

Наиболее общими техническими решениями и мероприятиями по экономии энергии в большинстве процессов нагрева являются следующие:

должны использоваться отражательные экраны для аккумуляции теплоты в области процесса;

если необходим непрерывный процесс нагрева, то периодический процесс должен быть им заменен. При этом КПД процесса увеличивается и для вторичного нагрева детали требуется меньшее количество энергии;

необходимо применять автоматическое регулирование процессов, если оно может увеличить КПД;

необходимо использовать, где возможно, изоляцию. При этом изоляционные материалы должны быть водонепроницаемы;

в некоторых процессах эндо- и экзотермические реакции могут исключить необходимость «внешнего» нагрева и сами могут служить источником теплоты;

во всех случаях следует применять топливо необходимого качества;

в непрерывных процессах термообработки или сушки при входе и выходе из рабочей зоны могут использоваться воздушные завесы.

5.11. Печи для сжигания отходов

Печи для сжигания отходов имеют иногда весьма сложное оборудование, которое предназначается для обработки твердых, жидких и газообразных отходов, и их экономичная эксплуатация может

быть обеспечена только в том случае, если к ним будет такой же подход, как к котлам и печам. Печи для сжигания отходов все чаще стали применяться в рамках общих мер по защите окружающей среды. В настоящее время имеются такие печи, в которых применяются каталитические процессы для регулирования выбросов.

При сжигании отходов в печах выделяется теплота, поэтому для них применяются такие же методы утилизации теплоты, которые рассмотрены в гл. 6. Чтобы снизить эксплуатационные расходы, здесь, как и везде, применяют предварительный нагрев воздуха для горения, соответствующую теплоизоляцию, такие горелки, которые позволяют использовать низкачественные виды топлива, а также регулирование температуры для обеспечения минимальной температуры сжигания. Если печь для сжигания отходов поставляется без утилизационного оборудования, а потенциальная возможность утилизировать сбросную теплоту имеется, необходимо установить такое оборудование, что естественно позволит снизить расход топлива. Прежде чем сжигать отходы, следует убедиться, не могут ли эти отходы использоваться как топливо (гл. 6).

5.12. Освещение на заводах и в административных зданиях

Освещение — это еще одна область, которой пренебрегали при рассмотрении вопросов экономии энергии. Однако сегодня этим

Таблица 5.2. Характеристики основных типов ламп

Характеристики	Лампы накаливания (включая галогенно-вольфрамовые)	Люминесцентные (дневного света) лампы
Мощность (собственно лампы), Вт	15—1500	40—219
Срок службы, ч	750—12 000	9000—30 000
Световой эквивалент потока излучения, лм/Вт	15—25	55—88
Цветопередача	От очень хорошей до отличной	От хорошей до отличной
Регулирование направления света	От очень хорошего до отличного	Достаточное
Исполнение источника	Компактное	Увеличенное
Время повторного включения, мин	Без задержки	Без задержки
Стоимость арматуры	Низкая*	Средняя
Сравнительные эксплуатационные расходы	Высокие из-за относительно короткого срока службы и низкой интенсивности освещения	Ниже, чем для ламп накаливания, однако замена их дороже, так как требуется больше ламп. Стоимость энергии ниже, чем для ртутных ламп

* Из-за простоты арматуры.

заняты крупнейшие фирмы и научные учреждения. Характеристики наиболее широко применяемых ламп приводятся в табл. 5.2 [5.23].

Лампы накаливания и ртутные лампы обладают относительно низким световым эквивалентом потока излучения (рис. 5.13). Люминесцентные лампы с этой точки зрения гораздо лучше, и еще лучше натриевые и металлогалогенные лампы.

Лампы с высоким световым эквивалентом потока излучения широко применяются из-за их большого срока службы. В настоящее время имеются белые люминесцентные лампы со световым эквивалентом потока излучения свыше 70 лм/Вт, которые обладают также высокой цветопередачей, их применение особо желательно при необходимости установки ламп на большой высоте.

При установлении стандартов освещения очень важна правильная эксплуатация системы. Влияние периода эксплуатации на освещенность приводится в табл. 5.3.

Светимость любой лампы со временем снижается, а световой эквивалент потока излучения, лм/Вт, указываемый изготовителями, соответствует мощности, которую лампа дает через период, равный трети срока службы (т. е. после 2000 ч при сроке службы лампы 7500 ч). Люминесцентные лампы и осветительные установки, работающие под высоким давлением, могут иметь высокую светимость и после их номинального срока службы при меньших расходах электрической энергии в отличие от ламп накаливания. Именно поэтому должна осуществляться

Ртутные лампы	Металлогалогенные лампы	Натриевые лампы высокого давления
40—1000	400, 1000, 1500	75, 150, 250, 400, 1000
16 000—24 000	1500—15 000	10 000—20 000
20—63	80—100	100—130
От плохой до очень хорошей	От хорошей до очень хорошей	Достаточная
Очень хорошее	Очень хорошее	Очень хорошее
Компактное	Компактное	Компактное
3—5	10—20	< 1
Выше, чем для ламп накаливания, обычно выше чем для люминесцентных ламп	Обычно выше, чем ртутных ламп	Самая высокая
Ниже, чем для ламп накаливания; стоимость замены сравнительно низкая из-за небольшого количества арматуры и длительного срока службы	Ниже, чем для ртутных ламп; меньше требуется арматуры, но срок службы меньше, а расходы на единицу освещения достаточно велики	Самые низкие, требуется меньше арматуры

Таблица 5.3. Влияние периода эксплуатации на освещенность для промышленных светильников

Место размещения	Освещенность, %*, при продолжительности между работами по очистке, мес**			
	3	6	12	24
Чистый цех	1,00	0,99	0,98	0,94
	1,00	0,99	0,98	0,94
Чистый цех с кондиционированием воздуха	0,98	0,97	0,96	0,90
	0,95	0,84	0,82	0,76
Цех сборки	0,97	0,90	0,88	0,82
	0,90	0,82	0,74	0,57
Механический цех	0,90	0,82	0,79	0,71
	0,87	0,73	0,65	0,48
Литейный цех	0,89	0,78	0,73	0,64
	0,84	0,67	0,59	0,42

* В процентах номинальной.

** В числителе — данные для специальных светильников, в знаменателе — для обычных.

Примечание. Эти цифры типичны только для использования светильников типа ВЗЗ для очень больших помещений со стенами, обладающими в среднем 30%-ной отражательной способностью; к обычным светильникам относятся открытые промышленные светильники. К специальным светильникам относятся светильники, обладающие свойством самоочистки, они либо полностью закрыты, либо не закрыты совсем, при этом открытые светильники имеют лучшие эксплуатационные свойства, чем закрытые.

ся программа замены светильников. Рекомендуется чистить не только лампы, но и сами светильники. Если некоторые лампы под действием воздушного потока до некоторой степени очищаются, то все рефлекторы имеют тенденцию через некоторое время загрязняться. Поверхности стен и окон также должны содержаться в чистоте, поскольку они поглощают полезный свет.

Желательно проводить регулярный анализ (каждый 5—10 лет) применяемых типов освещения и заменять устаревшие модели новыми.

Кроме выбора светильника и его правильной эксплуатации для получения экономии энергии необходимо иметь в виду и ряд других мероприятий:

лампы должны отключаться, если в них больше нет необходимости. Большая часть внутреннего освеще-

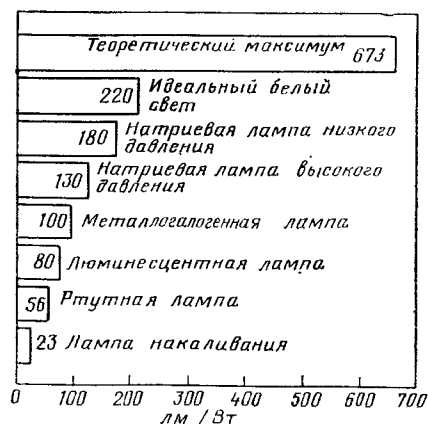


Рис. 5.13. Сравнительная интенсивность освещения различных ламп

щения вблизи окон в дневное время должна отключаться. Это следует учитывать при проектировании освещения для крупных административных зданий;

должны использоваться устройства временного отключения освещения;

стены и потолки должны покрываться светлой краской, снижающей уровень требуемого освещения;

освещение должно выбираться с учетом рода деятельности в данном помещении и количества персонала;

теплоту, выделяемую при освещении и добавляемую к нагрузке воздушного кондиционера, можно успешно использовать зимой для отопления (гл. 6).

Фирма Shell UK Ltd подсчитала, что наибольшую экономию (3% энергии, 6 тыс. ф. ст. /год) в ее административном корпусе в Лондоне можно получить за счет замены ламп накаливания люминесцентными лампами с периодом окупаемости 2—3 года. Металлогалогенные лампы с улучшенными рассеивателями дают значительную экономию в котельных и цехах завода. Ведутся работы по изготовлению светильников, в которых будут предусмотрены три люминесцентные трубки с возможностью отключения одной из них. Фирма Shell считает, что такие светильники дают 25%-ную экономию энергии и эксплуатационных расходов с периодом окупаемости 5 лет. Фирма предусматривает в своем административном корпусе также и широкое использование системы контроля за освещением. Если для местного освещения с целью снижения расхода энергии рекомендуется ряд устройств временного отключения, то в крупном здании целесообразно применение одного устройства для автоматического отключения освещения, например в коридорах, конференц-залах. При этом капиталовложения в 3 тыс. ф. ст. смогут окупиться за 2 года [5.20]. На другом заводе фирмы 23 лампы накаливания по 1 кВт были заменены таким же количеством натриевых ламп высокого давления по 400 Вт. В результате освещенность устроилась (составила 390 люкс), а нагрузка снизилась с 23 до 10,35 кВт. При этом общие капиталовложения в установку (1996 ф. ст.) окупились за 2,6 года.

5.13. Промышленные здания

Меры по экономии энергии в промышленных зданиях имеют много общего с мерами, рекомендованными для систем кондиционирования воздуха и других рассматриваемых здесь установок. Однако имеются и свои специфические особенности.

Большая часть воздуха, поступающего в промышленное здание извне, требует доведения его до приемлемых внутренних условий; теплоту отработанного воздуха можно утилизировать для подогрева приточного воздуха и поддержания комфортных и безопасных условий. Если применяется принудительная вентиляция, то избыточное использование воздуха означает рост эксплуатационных расходов. Большинство промышленных зданий имеют большие двери, монтажные площадки и пр. Но даже небольшие отверстия, такие как неиспользуемые вентиляционные каналы и щели в крыше, могут привести к значительным потерям теплоты. Для защиты длительно открытых дверей можно использовать завесы теплым воздухом.

Для компенсации потерь теплоты через открытые двери требуется значительный расход энергии. На рис. 5.14 приводится расход топлива для нагрева приточного воздуха в зависимости от скорости ветра и

площади открытых дверей. Для двери площадью 3×3 м в пересчете на внешнюю температуру -1°C и внутреннюю температуру 18°C , чтобы компенсировать потери теплоты через открытую дверь нужно затратить в течение 3 мес приблизительно 1900 ф. ст. (Принимается, что здание отапливается от теплового источника с КПД 80% в течение 8 ч в сутки 5 дней в неделю.)

Установка воздушной завесы будет стоить гораздо дешевле. Эксплуатационные расходы на воздушную завесу низки, в некоторых случаях достаточен воздух комнатной температуры, правильно направленный по дверным проемам. При этом может использоваться имеющаяся нагревательная установка или независимый источник теплоты.

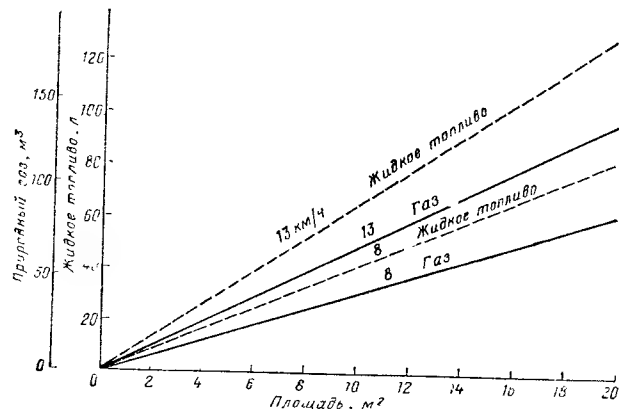


Рис. 5.14. Количество топлива, теряемое за счет ухода через открытые двери в здании теплого воздуха. Расход топлива в час на нагрев приточного воздуха до температуры 19°C

Пересчет: а. Жидкое топливо = $37\,500$ Дж/л, б. Природный газ = $41 \cdot 10^6$ Дж/м³

Для конвекторов и радиаторов используются неэлектрические вентили регулирования. Они устанавливаются на имеющемся оборудовании и не требуют дистанционной термостатической проводки, что упрощает всю конструкцию. Такие вентили в ряде случаев дают 40% экономии энергии; они наиболее применимы в небольших помещениях, например конторах. Если используется конвекционный газовый обогрев, все поверхности должны регулярно чиститься, а горелочные устройства регулярно проверяться. Для повышения эффективности системы предупредительной мерой служит также и очистка поверхностей радиационного нагрева.

Системы теплоснабжения в период отсутствия в помещениях людей должны отключаться. Радиационный нагрев происходит очень быстро, так что персонал не испытывает каких-либо длительных неудобств после включения системы. В ограниченных пространствах более эффективно использовать прямой конвекционный нагрев.

Если смена начинает и кончает работу в разные часы, то обогрев более продолжителен, чем при одновременном начале и конце работы.

Двери и окна на противоположных стенах не должны быть открытыми, так как сквозняк вызывает рост потерь теплоты. Рекомендуется применять самозакрывающиеся двери, но они должны быть хорошо отлажены, чтобы исключить заклинивание во время открытия. Зимой для регулирования температуры желательно окна не использовать. В некоторых зданиях, особенно в лабораториях, необходима хорошая вентиляция для удаления вредных паров. В этих случаях вентилятор следует применять непосредственно в местах с вредными выбросами.

5.14. Внутривзаводские системы горячего водоснабжения

К мероприятиям по экономии энергии в этой области относятся:

снижение на несколько градусов максимальной температуры воды. Это не создает никаких неудобств и может быть легко достигнуто, в особенности если система отделена от основной системы теплоснабжения или нагрева технологической воды;

использование автоматических кранов, которые срабатывают, когда отбор воды закончен. Это экономит как холодную, так и горячую воду;

изоляция баков для хранения воды и длинных трубопроводов, ведущих к кранам горячей воды;

применение системы горячего водоснабжения;

использование сбросной технологической теплоты для нагрева воды в системе горячего водоснабжения;

размещение нагревателей и баков для хранения горячей воды вблизи от мест использования.

5.15. Приборы контроля за экономией энергии

Имеется несколько типов контрольно-измерительных приборов и оборудования, способствующих контролю за работой установок и оборудования с целью экономии энергии:

камеры инфракрасного излучения и системы сканирования. Они используются для определения мест утечки теплоты в печах и прочем оборудовании и для проверки надежности изоляции;

газоанализаторы. Анализ может быть рассчитан на измерение концентрации одного компонента или суммы концентраций нескольких компонентов анализируемой газовой смеси. Газоанализаторы применяются для контроля за КПД процесса горения и, следовательно, за расходом топлива;

расходомеры. Расходомеры для водных магистралей осуществляют контроль за количеством используемой воды. Расходомер топлива в системе отопления, работающий в течение суток, может выявить избыточное использование топлива с учетом отсутствия в здании персонала или с учетом высокой температуры окружающей среды;

приборы для регулирования температуры. Термостатически регулируемый нагрев при теплоснабжении или в технологических процес-

сах может позволить экономить энергию. Применяются также приборы для регулирования условий в помещении в зависимости от количества работающих людей;

измерение влажности. Влажность — очень важный показатель в кондиционировании воздуха и в таких технологических процессах, как сушка.

Приборы всех указанных выше типов обычно применяются в промышленности. Для ряда других областей имеются свои специфические приборы.

5.16. Пароотделители

Пароотделитель представляет собой автоматический вентиль, установленный на паропроводе для удаления конденсата и воздуха. Он может действовать по-разному: термостатические пароотделители реагируют на разницу температур между паром и конденсатом, а термодинамические — на фазовые изменения. Механические или конденсационные пароотделители с поплавком действуют в зависимости от изменения плотности среды, т. е. при наличии конденсата или воздуха.

Большое значение имеет надежность пароотделителя, так как наличие конденсата в теплообменниках снижает их КПД из-за уменьшения внутренней поверхности теплообмена. Наличие воздуха и других неконденсируемых газов приводит к такому же эффекту. Дioxid углерода и кислород в паре могут вызвать коррозию в трубопроводе и сократить срок службы теплообменника. Если пароотделитель повреждается в закрытом виде, то прекращается процесс нагрева. Чтобы исключить это — необходимо использовать байпасную систему; но если перепускной клапан остается открытым, то, естественно, эффективность нагрева постепенно ухудшается. Если быстро не провести ремонт, то используется избыточное количество пара и в результате снижается КПД процесса.

Если пароотделитель повреждается в открытом состоянии, то повреждение определить гораздо труднее. При этом перерасход энергии может быть очень высоким. Стоимость его для пароотделителя с давлением 30—150 кПа с жиклером размером от 9 до 12,5 мм составляет величину, эквивалентную 500—1000 ф. ст. в месяц. В том случае, когда пароотделитель работает, но загрязнен, это может привести к 20%-ному увеличению расхода топлива [5.24].

Фирма Standart Oil (США) разработала программу по предотвращению утечек пара и ремонту пароотделителей [5.25]. В результате расход пара на нефтеперерабатывающем заводе в г. Ричмонде снизился на 30 кг/с. На заводе в г. Перт-Амбой, где имеется 2500 пароотделителей, выполнение программы, включающей проверку и ежемесячный ремонт, дало экономии 50% всего количества пара, сэкономленного на заводе. До этого на заводе в г. Ричмонде пароотделители сначала проверялись 1 раз в 3 мес, и повреждения при этом все же составляли 10—15%. Фирма ICI Petrochemical Div [5.20] использует ультразвуковые детекторы для контроля за состоянием пароотделителей. Здесь также используется запись телевизионного изображения на магнитную ленту для контроля за работой и правильной установкой и определения мест повреждения пароотделителей.

5.17. Резервуары для хранения горячих продуктов

Если продукт должен храниться при температуре выше (или ниже) температуры окружающей среды или если она должна нагреваться в резервуаре, необходимо провести ряд предупредительных мер, чтобы снизить потери теплоты или улучшить степень нагрева: баки и резервуары должны быть изолированы или закрыты крышкой;

если бак является источником значительного количества сбросной теплоты, как, например, на пивоваренном заводе, следует применять соответствующую утилизационную технику;

для более эффективного нагрева в резервуарах рекомендуется применять нагрев погружением вместо нагрева снизу или снаружи резервуара. Если же изоляция оказывается непригодной для такого нагрева, следует использовать несколько нагревателей с хорошей защитой. Для нагрева может использоваться также погруженное горение;

погруженные нагреватели должны регулярно проверяться для обеспечения чистоты поверхностей;

в системе с нагревателем должны использоваться термометры, чтобы предотвратить повышение температуры выше необходимой;

если имеется горячий сток, он должен пропускаться через змеевик, погруженный в резервуар для хранения с целью экономии хотя бы некоторого количества энергии, затрачиваемой на нагрев.

5.18. Топливные добавки

В настоящее время широко рекламируются топливные добавки. Производители считают, что эти добавки могут решить широкий круг проблем, ведущих к повышению КПД горения, снижению эксплуатационных расходов и уменьшению вредных выбросов. Одна из добавок к топливной нефти дает следующие преимущества:

предотвращает образование шлама в резервуарах для хранения топлива и сводит до минимума окисление в горелке;

увеличивает КПД горения;

снижает низко- и высокотемпературный нагар и коррозию;

регулирует выделение кислотной сажи и копоти.

Другие добавки к нефти или природному газу предотвращают образование окислов на металле во время обработки [5.26].

Обзор свойств топливных добавок для горелок приводился в [5.27]. Здесь же были определены сферы применения этих добавок и данные по их стоимости.

Вязкость — одна из проблем, связанных с использованием некоторых остатков топливной нефти. Высокая вязкость может вызвать относительно быстрое образование шлама как в резервуарах для хранения топлива, так и в нефтепроводах. Топливные добавки делают шламообразующие компоненты нефти сгораемыми. Это резко повышает КПД горения и снижает эксплуатационные расходы.

Высокая и низкотемпературная коррозия, вызываемая пентоксидом ванадия и серной кислотой также может быть уменьшена исполь-

зованием добавок, которые предотвращают образование этих соединений или нейтрализуют их действие.

При использовании топливных добавок повышается эффективность распыления топлива и соответственно КПД процесса горения [5.28].

Типичная цена на топливные добавки составляет 760—1520 пенсов на 1 м³ нефти. Очевидно, что это очень незначительная часть общей цены на топливную нефть.

Глава 6

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УТИЛИЗАЦИИ СБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ

Приведенные ранее материалы относились в основном к экономии энергии в конкретных отраслях промышленности, при этом описания процессов, на первый взгляд, могли показаться специфичными. Однако в действительности большинство процессов имеют много общего с точки зрения утилизации сбросной теплоты.

Повышение рентабельности установки, которое в большинстве случаев может быть осуществлено за счет использования рекомендованных в этой главе мероприятий, зачастую требует довольно значительных капиталовложений, однако обычно это дает большой экономический эффект.

Большая часть оборудования для утилизации сбросной теплоты описана в гл. 7.

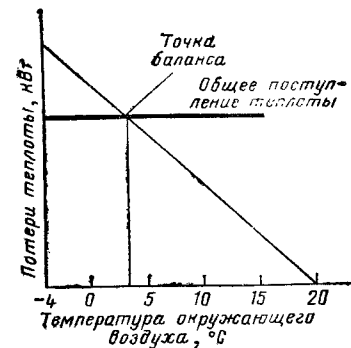
6.1. Кондиционирование воздуха

Система кондиционирования воздуха является наиболее сложным звеном, включающим большое количество элементов. Одна система кондиционирования воздуха может быть предназначена для нескольких сот помещений. При этом в промышленном здании существует множество разнообразных требований к различным зонам. Может одновременно возникнуть необходимость в нагреве и охлаждении, связанная с недостатками проекта либо с требованиями эксплуатации определенного типа аппаратуры, расположенного в здании, например электронно-вычислительных машин и т. д.

Поскольку системы кондиционирования воздуха в большинстве случаев потребляют электрическую энергию, компании, производящие ее, проявили интерес к повышению эффективности использования энергии в зданиях с кондиционированием воздуха. В двух публикациях, одна из которых была издана в Великобритании Комитетом Electricity Council [6.1], а другая — в США объединением Electric Energy Association [6.2], представлен наиболее полный отчет по способам регенерации энергии, которые могут применяться в зданиях, с обоснованием экономической эффективности различных технических решений.

Источники поступления теплоты и ее потери в здании. Для эффективного использования системы кондиционирования воздуха и

Рис. 6.1. Тепловой баланс зданий в зависимости от температуры окружающего воздуха



разработки технических решений по регенерации энергии необходим точный тепловой баланс здания. Потери теплоты в здании состоят из:

потерь, которые зависят от конструкции здания и которые обычно составляют половину теплоты, поступающей в здание;

потерь с воздушной вентиляцией — теплоты, затрачиваемой на нагрев воздуха, поступающего в здание для создания комфортных условий.

Источников поступления теплоты внутри здания множество:

осветительные приборы. Они могут рассматриваться как источники теплоты, хотя для получения конкретных данных необходимо провести точный статистический анализ системы освещения;

люди. Все находящиеся в здании люди выделяют метаболическую теплоту (около 100 Вт на человека);

электронно-вычислительные машины. Большая ЭВМ может быть источником значительного количества теплоты;

воздух, выбрасываемый из здания. Теплота его может быть утилизирована;

двигатели, приводящие в движение вентиляторы и насосы системы кондиционирования воздуха;

прочие виды оборудования, не связанные с системой кондиционирования воздуха.

Потери теплоты в здании зависят от температуры наружного воздуха и могут быть представлены на графике в виде прямой линии, при этом, естественно, потери теплоты возрастают с понижением температуры наружного воздуха. В принципе можно считать, что поступление теплоты не зависит от окружающей температуры (прямая линия, параллельная оси абсцисс на рис. 6.1). Пересечение двух линий дает точку теоретического баланса, в которой потери равны поступлению теплоты. Без перераспределения теплоты в отдельных частях здания практически невозможно достигнуть теоретического теплового баланса.

Тепловой баланс для здания в Великобритании при температуре наружного воздуха —4 °C и температуре внутри здания 21 °C [6.1] приведен ниже:

Источник потерь (поступления) теплоты	Поступление теплоты, кВт	Потери теплоты, кВт
Конструкция здания	—	378
Вентиляция	—	490
Осветительные приборы	550	—
Люди	100	—
Вентиляторы, насосы, компрессоры	218	—
	868	868

Методы утилизации теплоты. Утилизация теплоты в зданиях с кондиционированием воздуха может быть разделена на три категории: утилизация теплоты вентиляционных выбросов, утилизация теплоты систем освещения и утилизация сбросной теплоты холодильных машин.

Утилизация теплоты вентиляционных выбросов. Утилизация сбросной теплоты для нагрева свежего воздуха (или охлаждение поступающего свежего воздуха сбросным воздухом после системы кондиционирования летом) является простейшей формой утилизации.

При этом можно отметить четыре типа систем утилизации: вращающиеся регенераторы; теплообменники с промежуточным теплоносителем; простые воздушные теплообменники; трубчатые теплообменники.

Работа вращающегося регенератора в системе кондиционирования воздуха показана на рис. 6.2. Этот регенератор может повышать температуру приточного воздуха зимой на 15°C , а летом он может снижать температуру поступающего воздуха на $4-8^{\circ}\text{C}$ [6.3]. Как и в других системах утилизации, за исключением теплообменника с промежуточным теплоносителем, вращающийся регенератор может функционировать только в том случае, если вытяжной и всасывающий каналы прилегают друг к другу в какой-то точке системы.

Теплообменник с промежуточным теплоносителем менее эффективен, чем вращающийся регенератор, что подтверждается сравнением рис. 6.2 и 6.3. В представленной системе вода циркулирует через два теплообменных змеевика, и так как применяется насос, то два змеевика могут быть расположены на некотором расстоянии друг от друга. И в этом теплообменнике, и во вращающемся регенераторе имеются подвижные части (насос и электродвигатель приводятся в движение и это отличает их от воздушного и трубчатого теплообменников. Одним из недостатков регенератора является то, что в каналах может происходить загрязнение. Грязь может осажаться на колесе, которое затем переносит его во всасывающий канал. В большинстве колес в настоящее время предусмотрена продувка, которая сводит перенос загрязнений до минимума.

Простой воздушный теплообменник, схематически показанный на рис. 6.4, представляет собой стационарное устройство для теплообмена между отработанным и поступающим потоками воздуха, проходящими через него противотоком. Этот теплообменник напоминает прямоугольную стальную коробку с открытыми концами, разделенную на множество узких каналов типа камер. По чередующимся каналам идет отработанный и свежий воздух, и теплота передается от одного потока воздуха к другому просто через стенки каналов. Перенос загрязнений в теплообменнике не происходит, и поскольку значительная площадь поверхности заключена в компактном пространстве, достигается относительно высокая эффективность.

Теплообменник с тепловой трубой можно рассматривать как логическое развитие конструкции вышеописанного теплообменника, в котором два потока воздуха в камеры остаются абсолютно separable, связанными пучком ребристых тепловых труб, которые переносят теп-

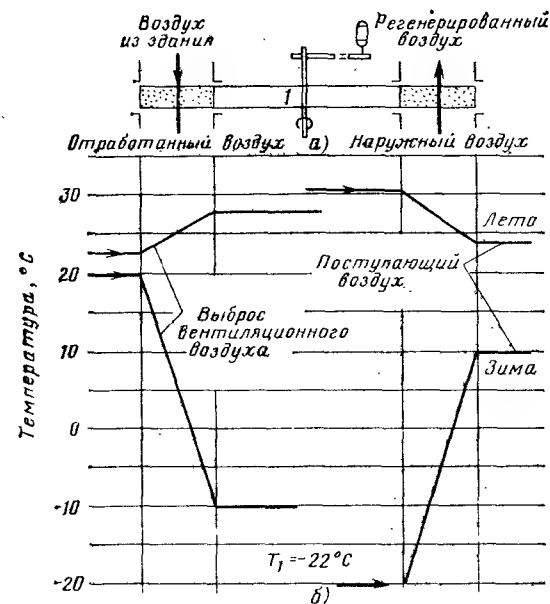


Рис. 6.2. Показатели работы вращающегося регенератора, применяемого для нагрева или охлаждения воздуха, поступающего в здание: а — схема регенератора; б — график температур. 1 — вращающееся колесо

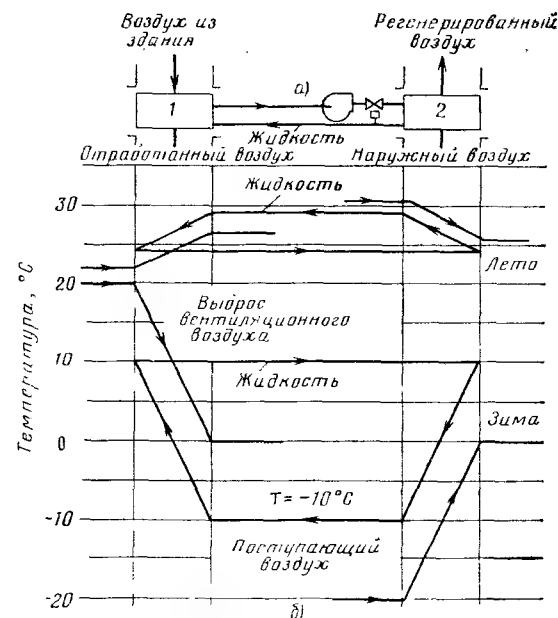


Рис. 6.3. Теплообменник с промежуточным теплоносителем. Показатели хуже, чем для регенератора, показанного на рис. 6.2:

а — схема установки; б — график температур. 1 — охладитель выбрасываемого воздуха; 2 — нагреватель поступающего воздуха

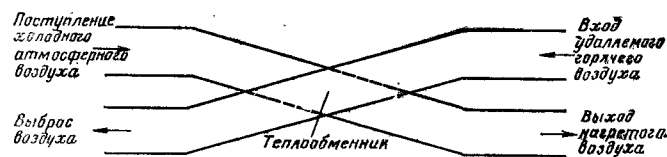


Рис. 6.4. Схематическое изображение стационарного воздушного теплообменника

лоту от одного канала к другому. Хотя стенка трубы может рассматриваться как дополнительное термическое сопротивление, эффективность теплопередачи внутри самой трубы, в которой происходит цикл испарения-конденсации, настолько велика, что в этих теплообменниках можно утилизировать до 70% сбросной теплоты. Одно из основных преимуществ этих теплообменников по сравнению с теплообменником с промежуточным теплоносителем и вращающимся регенератором — их надежность. Выход из строя нескольких труб лишь незначительно снизит эффективность работы теплообменника, но не остановит полностью систему утилизации.

Все приведенные системы утилизации отличаются высокой экономической эффективностью, в особенности для тех стран, в которых пределы измерения температуры наружного воздуха выше, чем в Великобритании и в некоторых европейских странах.

Что касается систем с тепловыми насосами, то их широкое применение желательно летом, а также во время зимнего отопительного сезона. Для завода, на котором условия специфичны, приведенные аргументы могут быть неприемлемы, так как может иметь место большая разница между температурами внутри здания и снаружи. В этих случаях безусловно выгодно применять теплообменники того или другого типа.

Системы утилизации теплоты освещения. В здании с кондиционированием воздуха можно наилучшим образом использовать теплоту, излучаемую лампами, которые являются основным источником поступления теплоты. Для достижения этого необходима осветительная арматура специального типа или светильники формы, показанной на рис. 6.5.

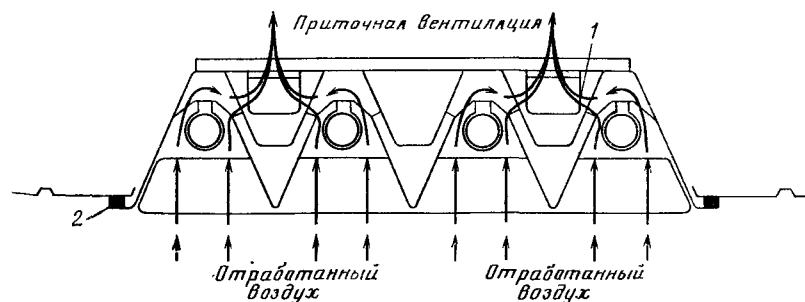


Рис. 6.5. Воздушное охлаждение люминесцентных ламп:

1 — распределительный механизм; 2 — прокладка

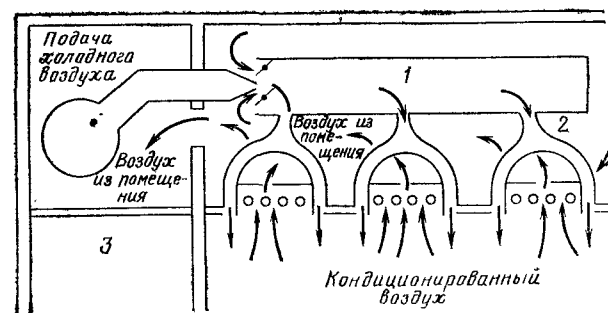


Рис. 6.6. Одноканальная система утилизации теплоты светильников:

1 — коллектор; 2 — светильники; 3 — коридор

В этом светильнике отработанный воздух отводят в камеру приточной вентиляции в потолке. Таким образом можно использовать до 50—65% энергии, затрачиваемой на освещение (с учетом всевозможных потерь в процессе утилизации).

На рис. 6.6 показана часть одноканальной системы утилизации теплоты, применяемой во внутренней зоне здания, в которой зимой может потребоваться одновременно и обогрев, и охлаждение. Коллектор с термостатически регулируемой заслонкой является наиболее важным элементом в этой системе. Если требуется полное охлаждение, то 100% холодного воздуха поступает в это пространство. Если требуется нагрев, то теплый воздух из потолочной камеры постепенно подается в это пространство и смешивается с частью холодного воздуха. Теплый воздух приточной вентиляции может быть использован также для обогрева зон, расположенных по параметру здания.

Летом особенно желательно применение светильников, охлаждаемых воздухом, что приведет к снижению нагрузок системы кондиционирования.

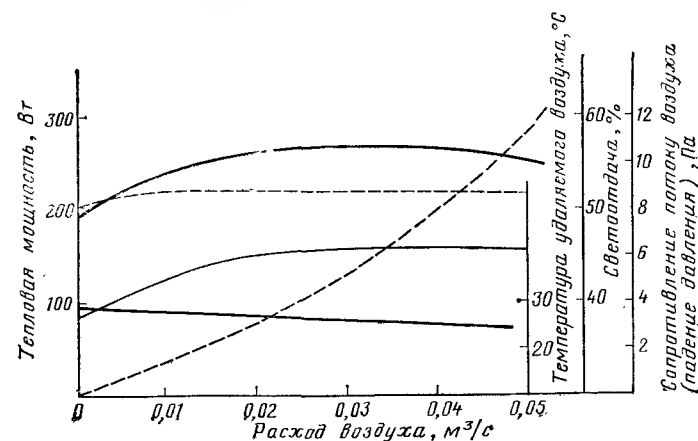


Рис. 6.7. Световые и тепловые характеристики светильников 2×1,8 м; 85 Вт

нирования воздуха. Преимущество применения таких светильников состоит также в повышении эффективности освещения. Работая при более низкой температуре, лампа может дать на 13% больше света при той же самой мощности. Однако переохлажденная лампа будет иметь более низкую мощность. Для люминесцентной лампы максимальная освещенность достигается при температуре стенки 40° С.

Характеристики светильника, изготовленного фирмой Osram—GEC, показаны на рис. 6.7. Они были получены с помощью специально соз-

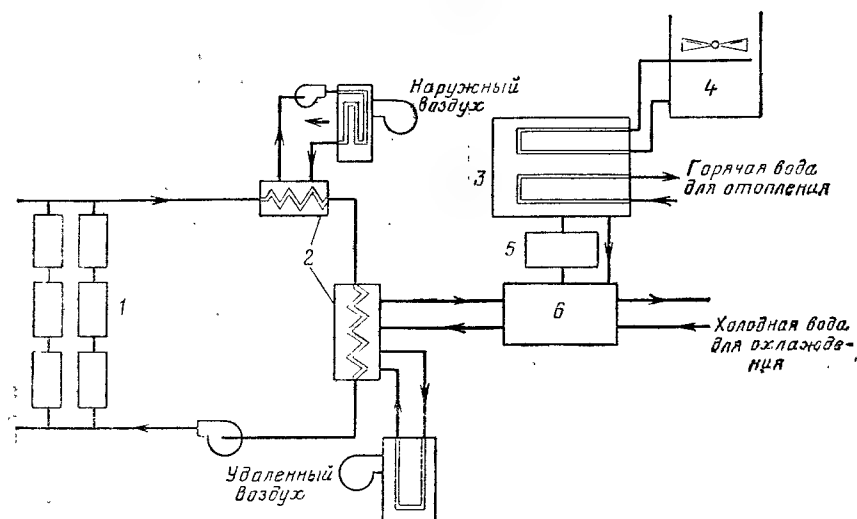


Рис. 6.8. Водяное охлаждение светильников, включение в систему утилизации теплоты холодильных машин:

1 — светильники, охлаждаемые водой; 2 — теплообменник; 3 — холодильник с двухступенчатым конденсатором; 4 — градирня; 5 — компрессор; 6 — испаритель

данного калориметра в исследовательских лабораториях фирмы GEC [6.4]. Температура в помещении была 22° С, падение давления измерялось вдоль светильника.

До сих пор рассматривались светильники, охлаждаемые воздухом. Можно также утилизировать теплоту от осветительных приборов, используя охлаждающую воду [6.2, 6.3]. Один из способов показан на рис. 6.8. Применяемые светильники имеют специальные алюминиевые кожухи отражателя с каналами для прохождения воды. Благодаря применению этого способа может быть утилизировано до 70% выделяющейся теплоты.

В одной конструкции жидкость из светильников перекачивается через испарительный теплообменник, сводя до минимума внутренний прирост теплоты. Если за счет освещения получают 50% поступления теплоты в здание, то отвод 70% теплоты непосредственно от осветительной арматуры может привести к сокращению на 35% общей нагрузки системы кондиционирования воздуха, а это немало. Зимой эту

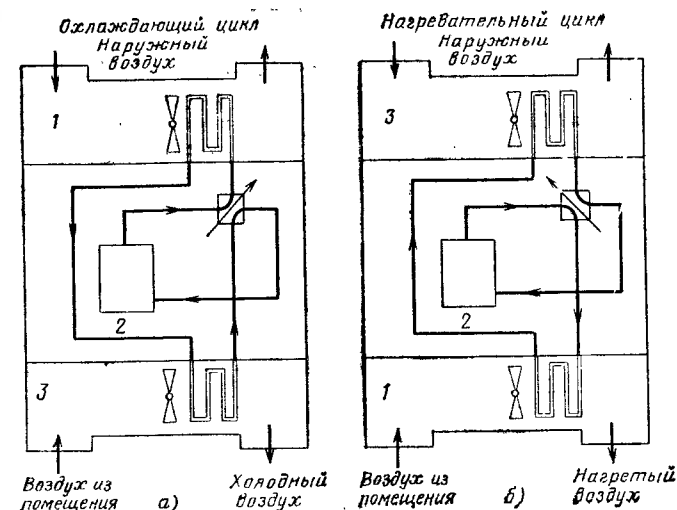
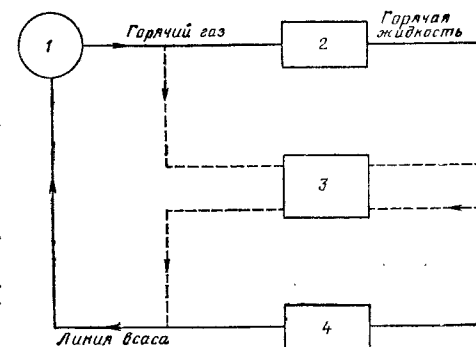


Рис. 6.9. Простой тепловой насос воздух — воздух, в котором наружный воздух используется в качестве источника теплоты зимой и поглотителя теплоты летом:

1 — конденсатор; 2 — компрессор; 3 — испаритель

Рис. 6.10. Тепловой насос, применяемый одновременно для обогрева и охлаждения в одном здании:

1 — компрессор; 2 — конденсатор; 3 — внешний источник или поглотитель теплоты; 4 — испаритель



систему можно отключать, чтобы иметь возможность использовать теплоту для создания при необходимости более комфортных условий.

Утилизация сбросной теплоты холодильных машин (тепловые насосы). Принцип работы теплового насоса и возможности его применения в промышленных областях детально рассмотрены в гл. 7. Однако, как подчеркивается в этой главе, тепловой насос будет внедрен в промышленность в течение нескольких лет, в то время как он уже успешно применяется в широких масштабах для кондиционирования воздуха в промышленных зданиях.

Типичные схемы применения тепловых насосов в системах кондиционирования показаны на рис. 6.9 и 6.10.

В схеме, приведенной на рис. 6.9, используется низкопотенциальная теплота воздуха для обогрева зимой, и тот же самый воздух используется как поглотитель теплоты летом.

На рис. 6.10 показан тепловой насос системы воздух-воздух для утилизации теплоты в двухканальной системе кондиционирования воз-

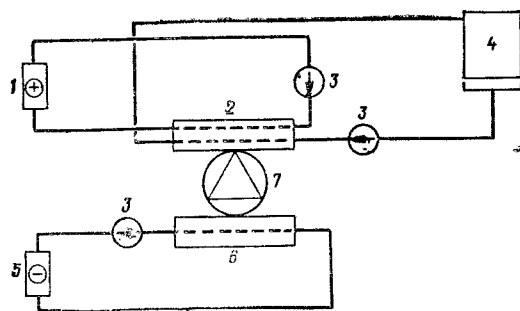
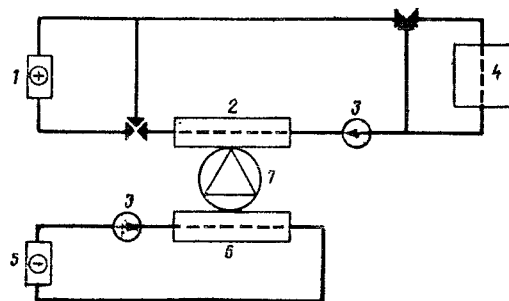


Рис. 6.11. Система утилизации теплоты с воздушной градирней:

1 — нагреватель; 2 — конденсатор; 3 — насос; 4 — градирня; 5 — охладитель; 6 — испаритель; 7 — холодильная машина

Рис. 6.12. Вариант системы, показанной на рис. 6.11, с использованием двухпучкового конденсатора



духа, с помощью которого одновременно осуществляется нагрев и охлаждение. Если в здании нет теплоты, которая должна быть утилизирована, например в периоды, когда здание пустует, источником теплоты может быть наружный воздух, и так же, как показано на рис. 6.9, наружный воздух может быть использован как поглотитель теплоты.

Источником низкопотенциальной теплоты может быть вода. При этом могут быть применены две схемы, показанные на рис. 6.11 и 6.12 и отличающиеся тем, что в одной из них (рис. 6.12) применяется двухпучковый конденсатор с двумя отдельными водяными контурами, заключенными в общий кожух. Теплота, выделяемая при конденсации рабочей жидкости теплового насоса, может быть направлена в каждый из контуров, а также в оба сразу в зависимости от потребностей. Кроме того, при разделении конденсатора устраняется возможность загрязнения воды в здании из-за применения открытой системы охлаждения.

Теплоту, полученную в течение дня от освещения, работающего оборудования и присутствия людей, можно аккумулировать и сохранить для использования в течение ночи. Она может быть использована для компенсации потерь теплоты в здании через стены и окна. Это может быть осуществлено путем сбора воды в качестве источника теплоты для теплового насоса. Система этого типа с запасом воды 90 тыс. л., хранящейся при температуре 52°C, способна обеспечить 2,2 ГДж/ч теплоты в течение 7 ч, при этом вода подается к испарителю теплового насоса с температурой 15°C [56.5]. Использование дополнительного обогрева в аккумуляторе может удовлетворить потребность в теплоте

в течение более длительного периода времени или в периодические пики. Для дополнительного нагрева может использоваться электроэнергия непикового периода графика нагрузки, и если температура воды будет достаточно высокой, то из аккумулятора можно непосредственно направлять теплоту в здание.

6.2. Котлы

Возможные пути утилизации теплоты котлов были уже рассмотрены в гл. 5. В этом параграфе будут рассмотрены три вопроса, связанные с работой котла и включающие в себя различные пути сохранения энергии:

- использование воздухоподогревателей;
- возврат конденсата;
- утилизация теплоты при продувке котла.

Среди них только воздухоподогреватель подробно описан в гл. 7 в связи с применением во многих других установках.

Использование воздухоподогревателей. Был проведен анализ [6.6] влияния вращающегося регенератора для подогрева воздуха, поступающего в зону горения, на работу котла и анализ экономической эффективности установки регенератора. Вращающиеся регенераторы детально рассмотрены в гл. 7. Их применение для котла в качестве подогревателя воздуха показано на рис. 6.13.

Ниже приведены данные по котлу, работающему на жидком топливе и оснащенному экономайзером, температура воды в котором повы-

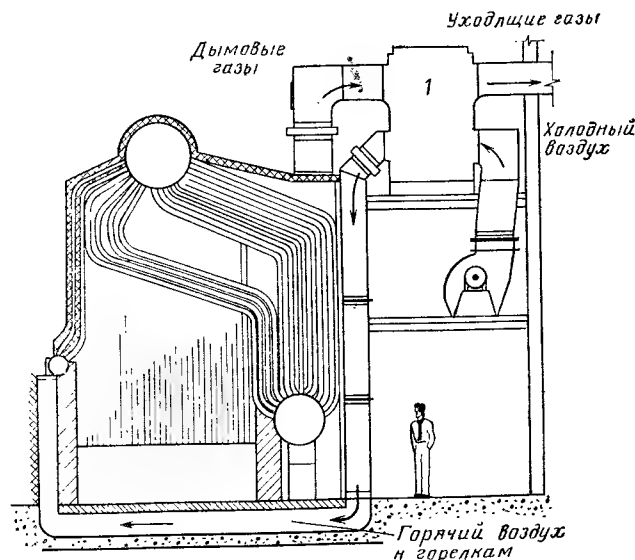


Рис. 6.13. Вращающийся регенератор фирмы James Howden с горизонтальным валом для подогрева воздуха в котле:

1 — подогреватель

шается со 150 до 260 °С, и воздухоподогревателем, в котором воздух, поступающий в зону горения, нагревается с температуры наружного воздуха до температуры 70 °С:

Расход пара, кг/с	38
Расход топлива, кг/с	2,5
Количество воздуха для сжигания, кг/с	41
Количество топочного газа, кг/с	43,5
Содержание кислорода в топочном газе, %	3
Температура наружного воздуха, °С	15,6
Температура уходящих из экономайзера газов, °С	450
Высшая (низшая) теплота сгорания топлива, кДж/кг	55 400 (41 400)
Содержание серы в топливе, %	2,5
Стоимость топлива, ф. ст/т	24
Стоимость электроэнергии, пенс/(кВт·ч)	0,75

Выбор вращающихся регенераторов может осуществляться потребителем на основе данных, представленных производителем. Однако может возникнуть необходимость в проведении оптимизационных расчетов с учетом таких факторов, как капитальные затраты, количество утилизированной теплоты и дополнительное сопротивление в газовом тракте в результате установки регенератора. Капитальные затраты должны включать соответствующие затраты на реконструкцию котла, связанную с установкой регенератора.

Решено было выбрать температуру уходящих газов 155° С без учета протечек холодного воздуха, возникающих из-за плохой герметизации воздушного и газового каналов. При этом средняя температура металла составляет 116° С, а температура газа на выходе 140° С. Количество газа и воздуха пересчитано с учетом экономии топлива, которая при вышеуказанной температуре уходящих газов составляет около 3,8%. С учетом вышеизложенного основные исходные данные для проектирования подогревателя следующие:

Количество газа на входе, кг/с	41,85
Количество воздуха на выходе, кг/с	39,5
Температура газа, °С:	
на входе	232
на выходе без учета протечек	155
с учетом протечек	149
Температура воздуха на выходе (по тепловому балансу), °С	157

Как было упомянуто выше, для создания оптимальной установки утилизации теплоты в соответствии с проектными условиями необходимо провести детальный анализ и сопоставление стоимости изготовления и установки оборудования с количеством утилизированной теплоты. Характеристики вращающихся регенераторов фирмы James Howden представлены в табл. 6.1.

Результаты анализа показывают, что в этом случае вращающийся регенератор 18,5 HS700 имеет минимальную общую стоимость, хотя он не самый дешевый с точки зрения капитальных затрат. В текущих расходах учитывается стоимость электроэнергии, затраченной на

Таблица 6.1. Выбор оптимального типа подогревателя воздуха

Характеристики	19HS700	18 $\frac{1}{2}$ HS700	18HS700	17 $\frac{1}{2}$ HS750	17HS800
Падение давления со стороны газа, кПа	0,40	0,47	0,62	0,72	0,94
Падение давления со стороны воздуха, кПа	0,41	0,33	0,43	0,50	0,65
Общее падение давления, кПа	0,68	0,80	1,05	1,22	1,58
Напор дымососа, кПа	1,53	1,61	1,75	1,86	2,07
Напор дутьевого вентилятора, кПа	2,34	2,39	2,50	2,57	2,70
Эксплуатационные расходы на дымосос, ф. ст.	38 205	40 056	43 451	46 228	51 474
Эксплуатационные расходы на вентилятор, ф. ст.	38 616	39 435	41 073	42 301	44 554
Суммарные эксплуатационные расходы	76 821	79 491	84 524	88 529	96 028
Капитальные затраты, ф. ст. на:					
подогреватель, включая монтаж и запасные части	49 010	45 340	42 490	40 150	38 220
замену колес вентилятора, сцеплений и двигателей, включая монтаж	17 280	17 280	17 280	17 280	17 280
систему труб, компенсаторы, демпферы, контрольно-измерительные приборы, включая монтаж	35 520	33 870	32 370	30 890	29 400
Суммарные капитальные затраты, ф. ст.	101 810	96 490	92 140	88 320	84 900
Суммарные капитальные затраты и эксплуатационные расходы, ф. ст.	178 631	175 181	176 664	176 849	180 928

преодоление сопротивления регенератора. Расчет периода окупаемости капитальных вложений, т. е. продолжительности времени, в течение которого чистые сбережения топлива равны капитальным затратам на оборудование, представляет собой распространенный метод при выборе оборудования для экономии энергии.

Расчет лучше всего проводить для определенного уровня цен на топливо и электроэнергию, с тем чтобы можно было оценить влияние предполагаемого их повышения. В приведенных ниже данных предполагается, что топливо стоит 28 ф. ст/т, а электроэнергия 0,75 пенс/кВт. Ранее указывалось, что экономия топлива составляет около 3,8%, поэтому при условии работы в течение 8000 ч в год общая экономия энергии эквивалентна 75 630 ф. ст. Дополнительные затраты электрической энергии на вентилятор для преодоления сопротивления нужно вычесть из этой величины, чтобы получить чистую экономию топлива. Следует также учитывать энергию, необходимую для вращения регенератора, который обычно приводится в действие с помощью электродвигателя. Общая потребность в электроэнергии составляет 35,7 кВт, что эквивалентно 2140 ф. ст/год. Таким образом, чистая эко-

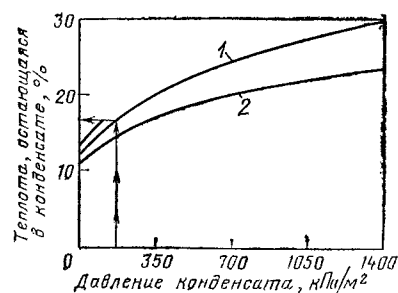


Рис. 6.14. Зависимость теплоты, остающейся в конденсате, от давления конденсата и параметров пара:
1 — насыщенный пар с давлением 1,38 МПа;
2 — перегретый пар с давлением 2,9 МПа и температурой 400°С

номия энергии эквивалентна 73 490 ф. ст/год, а период окупаемости капитальных затрат (96 490 ф. ст.) составит около 16 мес.

Возврат конденсата. Возврат конденсата в котел при условии, что конденсат отвечает требованиям по качеству, представляет собой наиболее простой метод экономии теплоты, и это может дать от 10 до 30% экономии топлива, сжигаемого в котле для получения пара [6.71].

Рассмотрим один из примеров повышения экономической эффективности за счет возврата конденсата. Насыщенный пар подавался к зданию с давлением 1,380 МПа в количестве 3,4 кг/с в среднем в течение 8000 ч в год (стоимость пара принята равной 2,2 ф. ст. за 1000 кг). Давление пара снижалось с помощью регулирующих клапанов, и пар конденсировался в теплообменниках при давлении 172 кПа. Конденсат возвращался в котел в виде питательной воды.

Насыщенный пар с давлением 1,380 МПа имеет энтальпию 2786 кДж/кг, а энтальпия добавочной воды, если бы конденсат не возвращался в котел, составляет 88,4 кДж/кг (при температуре 20°С). Доля теплоты, оставшейся в конденсате, может быть также вычислена с помощью диаграммы, приведенной на рис. 6.14.

Из этого рисунка видно, что из насыщенного пара с давлением 1,380 МПа в конденсате с давлением 0,172 МПа остается 17% теплоты.

Таким образом, общее количество утилизированной теплоты за год составляет $0,17 (2786 - 88,4) \cdot 3,4 \cdot 3600 \cdot 8000 = 4,5 \cdot 10^{10}$ кДж.

Стоимость утилизированной теплоты составляет 42 600 ф. ст.

В этом расчете допускается, что при возврате конденсата в котел не происходит потерь теплоты. Практически потери теплоты зависят от длины конденсатопровода и его теплоизоляции. Необходимо также учитывать, что при утилизации конденсата получают экономию за счет того, что не требуется дополнительного количества воды и химикатов для ее обработки. В любом анализе безусловно должна учитываться стоимость системы возврата конденсата.

Утилизация теплоты при продувке котла. Котловая вода в большинстве случаев содержит взвешенные или растворенные твердые вещества, которые приводят к образованию накипи и отложений на теплопередающих поверхностях. Продувка котла может быть периодической либо непрерывной. Величина ее определяется общей концентрацией растворенных твердых веществ. Рекомендуемая общая концентрация растворенных твердых веществ в современном барабанном котле составляет 2000—3000 млн⁻¹ [6.8].

Обычно на практике котлы продувают периодически. Это дает возможность проводить этот процесс в наиболее удобное время, когда общая концентрация растворенных твердых веществ высокая, а производительность котла низкая. Таким образом, вместе с потоком воды обеспечивается унос осадка, скопившегося у выхода.

Однако периодическая продувка становится менее желательной по ряду причин. В Великобритании система водоподготовки такова, что питательная вода имеет сравнительно низкое качество, а это означает более высокую концентрацию растворенных твердых веществ и

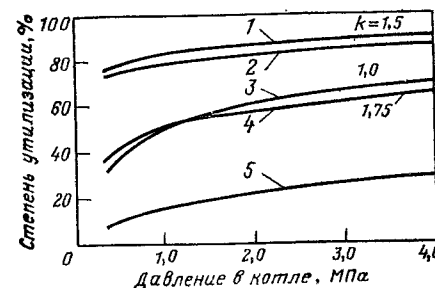


Рис. 6.15. Утилизация теплоты и воды продувки котла

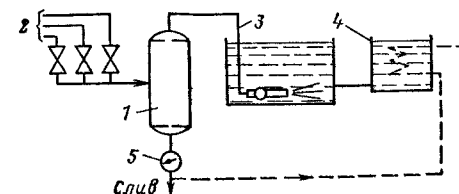


Рис. 6.16. Утилизация теплоты мгновенного испарения для нагрева питательной воды:

1 — испаритель мгновенного действия; 2 — клапаны; 3 — подпиточный бак; 4 — резервуар; 5 — регулятор уровня. — — — вариант применения обычного теплообменника

более высокие требования к продувке. Кроме того, в современных котлах периодическая продувка, связанная со значительными перепадами температур и падением давления, может создавать дополнительные проблемы. Существующие инструкции, ограничивающие температуру, при которой сточные воды могут быть сброшены в канализационную систему, также препятствуют применению периодической продувки.

Другой вариант — это непрерывная продувка котла. Считается, что использование непрерывной системы продувки не препятствует повышению производительности и давления пара в котле. Рекомендовано [6.8] применять непрерывную продувку, если величина ее превышает 10^{-2} кг/с.

Под самим термином «непрерывная продувка» подразумевается непрерывный отвод потока горячей воды из котла. Содержащаяся в этом потоке воды теплота может быть утилизирована в испарителе мгновенного действия или в теплообменнике, при этом регенерированная теплота используется для нагрева воды котла, предварительного нагрева топлива или воздуха для горения. При этом количество теплоты, которая может быть утилизирована, зависит в большой степени от способа ее использования.

На рис. 6.15 наиболее эффективные и наиболее дорогостоящие процессы утилизации представлены кривыми 1 и 2. Эти процессы включают в себя испарители мгновенного действия и обычные теплообменники, с помощью которых осуществляется нагрев добавочной воды (рис. 6.16).

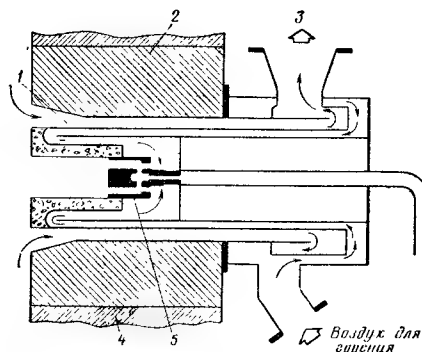


Рис. 6.18. Рекуперативная горелка, разработанная фирмой British Gas Corporation:

1 — вход продуктов горения из печи; 2 — литой огнеупорный блок; 3 — выход продуктов горения из печи; 4 — стенка печи; 5 — сопло горелки

до разливки в пресс-формы, и в связи с этим часто требуется быстрый нагрев. Было проведено несколько экспериментов, включающих:

определение времени и количества теплоты, необходимого для нагрева 180 кг алюминия из холодного состояния до 720 °С;

Таблица 6.2. Сравнение рекуперативной и нерекUPERATивной горелок для тигельной печи плавки алюминия [6.10]

Характеристики	Сплав LM13		Сплав LM14, печь Б горелка с насадкой
	Рекуперативная горелка фирмы MRS	Печь А, горелка со смешивающим соплом	
Производительность, кг	180	160	140
Температура, °С	720	720	7
Испытания в период расплава холодной загрузки			
Время плавки, мин	173	135	145
Тепловая мощность, кВт	110	175	248
Удельный расход теплоты, МДж/кг	6,37	8,81	16,66
Экономия топлива*, %	27,8	—	—
Экономия топлива**, %	61,5	—	—
Испытания в период выдержки			
Тепловая мощность, кВт	16,35	45	69
Удельный расход теплоты (при выдержке 1 ч), МДж/кг	0,32	1,03	1,83
Экономия топлива*, %	68	—	—
Экономия топлива**, %	82	—	—
Испытания с горячим расплавом перед разливкой			
Время плавки, мин	107	—	85
Удельный расход теплоты, МДж/кг	3,83	—	9,1
Экономия топлива**, %	57,5	—	—

* По сравнению с горелкой с соплом.

** По сравнению с горелкой с насадкой.

изменение количества теплоты, необходимой для поддержания температуры 720 °С сплава алюминия (180 кг) в тигельной печи; определение времени и количества теплоты, необходимой для нагрева алюминия до температуры 720 °С при предварительно нагретой тигельной печи.

Результаты, полученные для рекуперативной горелки мощностью 100 кВт, сравнивались с результатами, полученными для стандартной горелки со смешивающим соплом и горелки с насадкой. Они представлены в табл. 6.2. Печь А была того же типа, что и печь, применяемая для испытаний рекуперативной горелки, а печь Б хотя в основном была такой же, имела меньшую производительность.

6.4. Утилизация теплоты в сушилках. Системы с кипящим слоем

Как указывалось в гл. 4 и 5, сушка продуктов представляет собой процесс, который требует точного контроля условий его протекания с целью достижения минимального расхода энергии. Для многих типов промышленных сушилок применение систем утилизации теплоты может значительно снизить расходы на топливо.

Отводимый из сушилки воздух имеет высокое содержание воды, и поэтому его нельзя сразу же повторно использовать в сушилке. В связи с этим прежде чем сбросить воздух в атмосферу, теплоту обычно регенерируют с помощью теплообменника.

Не всегда учитывается тот факт, что сам осушенный продукт также содержит значительное количество теплоты. Ниже будет рассмотрена система использования теплоты, содержащейся в продукте для предварительного нагрева воздуха [6.12].

Косвенный теплообмен в сушилках. Большинство теплообменников типа воздух—воздух могут применяться в сушилках с учетом того, что отсасываемый и поступающий потоки воздуха не должны находиться в контакте друг с другом. Это — пластинчатые теплообменники рекуперативного типа, теплообменники с тепловыми трубами, теплообменники с промежуточным теплоносителем и наиболее современные системы с тепловыми насосами.

В большинстве сушилок всасывающий и вытяжной каналы находятся на противоположных концах установки, и поэтому змеевик удобен для передачи теплоты от одного конца к другому без затрат на дополнительные трубопроводы. Такой теплообменник, применяемый для сушилки непрерывного действия, показан на рис. 6.19. Змеевики во всасывающем и вытяжном каналах имеют форму теплообменников с увеличенной площадью поверхности. В данном примере [6.13] размеры канала составляют 1,2 × 0,75 м, средняя скорость воздуха 5 м/с, а количество отсасываемого воздуха — около 5 кг/с. Благодаря применению этого метода можно получить до 60% экономии первичной энергии, затрачиваемой на процесс сушки. Рабочим телом в змеевиках в большинстве случаев может быть вода, но если температура газов высокая, то могут применяться высокотемпературные теплоносители.

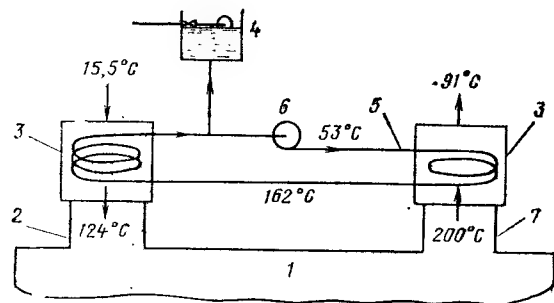


Рис. 6.19. Сушилка с утилизирующей теплотой с помощью теплообменников с промежуточным теплоносителем:

1 — сушилка; 2 — входной канал; 3 — теплообменник; 4 — напорный бак; 5 — контур с промежуточным теплоносителем; 6 — циркуляционный насос; 7 — вытяжной канал

Кольцевую систему можно также применять для предварительного нагрева воздуха для сушки с использованием сбросной теплоты и других процессов. Таким образом можно утилизировать такое количество теплоты, которое может обеспечить всю потребность сушилки в энергии в зависимости от ее производительности.

Применение пластинчатых теплообменников обычного типа также может дать хорошие результаты. Проблемы сушки, о которых упоминалось в гл. 5, можно упростить благодаря применению теплообменника этого типа. Применение его в барабанной сушилке показано на рис. 6.20. В этом случае поток отработанного газа $6,2 \text{ м}^3/\text{с}$ состоит из потоков избыточного воздуха ($3,4 \text{ м}^3/\text{с}$, избыток 230%) продуктов горения ($1,6 \text{ м}^3/\text{с}$) и водяных паров ($1,2 \text{ м}^3/\text{с}$). Относительная влажность выбросов около 10%, в них содержится $0,197 \text{ кг}$ воды на 1 кг сухого воздуха. В этом теплообменнике поступающий атмосферный воздух ($5,04 \text{ м}^3/\text{с}$) нагревается до температуры 110°C , а температура отработанного воздуха снижается со 120 до 66°C . Тепловая мощность для предварительного нагрева поступающего воздуха составляет 630 кВт . В рекуперативном теплообменнике [6.14] отработанные газы проходят внутри трубки, а подогреваемый воздух омывает ребристую наружную поверхность. Ребра, расположенные внутри, могли бы улучшить тепло-

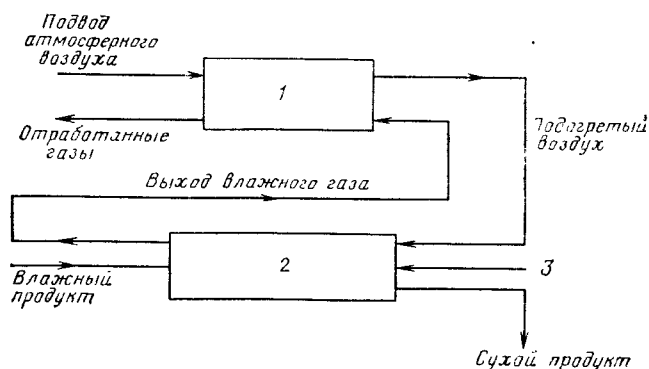


Рис. 6.20. Применение пластинчатого теплообменника в барабанной сушилке для регенерации теплоты:

1 — теплообменник с оребренными трубками; 2 — барабанная сушилка; 3 — горелка

передачу, однако очистка такой поверхности трудноосуществима. Количество утилизированной теплоты составляет до 18% общего количества энергии, вводимой в сушилку. Кроме того, конденсируется 10,5% водяных паров. Стоимость необходимого теплообменника была оценена в 13 тыс. ф. ст., а экономия топлива составила около 68 л/ч. Таким образом, период окупаемости был сравнительно коротким.

Полочные сушилки. В сушилках этого типа происходит непосредственная утилизация теплоты отработанных газов. Сушилка такого типа, в которой можно сушить кристаллы, волокнистую массу, порошки, таблетки и различные гранулированные материалы, показана на рис. 6.21. Она имеет ряд установленных одна за другой кольцеобразных полок, смонтированных на вращающейся стальной раме. Эти полки состоят из пластин в виде сегментов, расположенных таким обра-

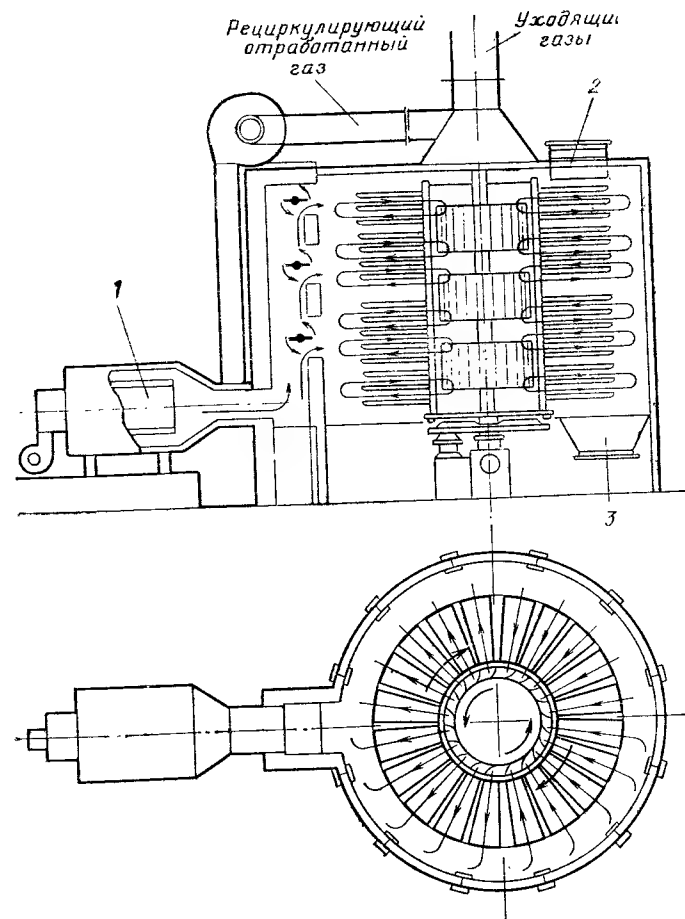


Рис. 6.21. Полочная сушилка, в которой применяется рециркуляция отработанных горячих газов:

1 — горелка; 2 — влажный материал; 3 — сухой материал

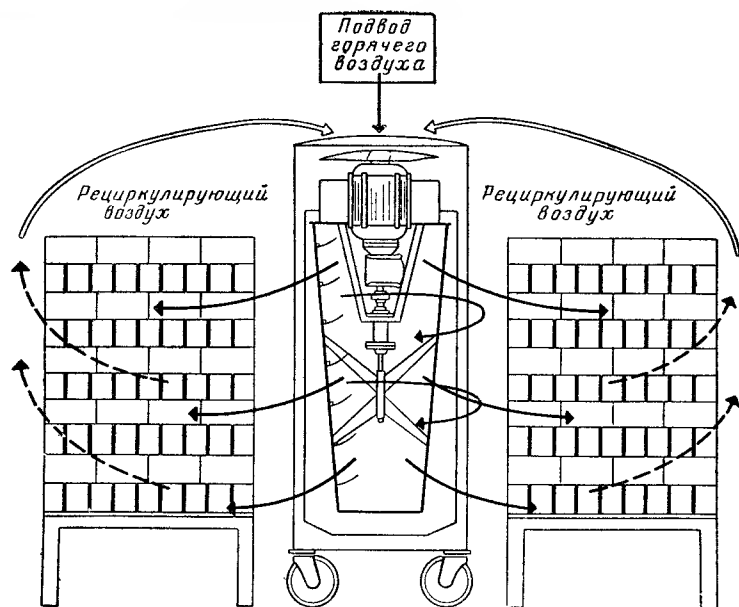


Рис. 6.22. Сушилка с вращающимися струями, которая использует прямую рециркуляцию воздуха

зом, что между прилегающими полками образуется щель. Турбовентиляторы, установленные на вертикальном валу, обеспечивают равномерное распределение потока воздуха, омывающего материалы, находящиеся на полках. Влажный материал поступает на верхнюю полку из специального фидера, а затем распределяется тонким слоем по вращающимся полкам. После того как каждая полка совершит один оборот, материал снимается с сегментной пластины скребками и попадает через щель на расположенную ниже сегментную пластину, после чего равномерно распределяется по всей поверхности полки.

Этот процесс повторяется с каждым слоем материала на каждой полке сушилки до тех пор, пока материал в сухом виде не попадет в выводной канал. Частота вращения полок определяется периодом сушки материала. Предусмотрен привод с переменной частотой вращения для возможности регулирования периода сушки без остановки машины. При переходе материала с одной полки на другую необходимо избегать сильного перемешивания и образования пыли.

Источником теплоты для турбополочной сушилки могут быть воздух, нагретый в паровоздушном теплообменнике, или непосредственно продукты сгорания различных видов топлива.

Воздухоструйные барабанные сушилки. В большинстве типов сушилок воздух обычно вводится в одном месте, а отводится в другом, вступая в контакт с материалом, подвергающимся сушке, только один раз. Воздухоструйная барабанная сушилка с рециркуляцией воз-

духа, изготовленная фирмой Cannon Air Engineering и применяемая главным образом для сушки кирпичей и других подсобных материалов, показана на рис. 6.22. Периодический процесс сушки, связанный с характером осушаемого продукта, проводится в камере, также показанной на рисунке.

Например, глину для быстрой сушки необходимо обдуть воздухом для удаления тонкой пленки воздуха с большим содержанием влаги, которая образуется на поверхности глины. Этот слой предотвращает испарение из глины, и его удаление связано с определенными трудностями. Если глину подвергать воздействию непрерывного потока воздуха, с помощью которого можно удалить влагосодержащую пленку, то происходит слишком быстрая сушка поверхности, в то время как внутри остается влага, что приводит к растрескиванию. Проблема решается с помощью вращающегося воздушного эжектора, который направляет поток воздуха на осушаемое глиняное изделие в течение нескольких секунд. Затем дают возможность влаге выделиться на поверхности до следующей подачи потока воздуха.

Вращающийся воздушный эжектор состоит из установленного наверху сушилки осевого вентилятора большой производительности. В подаваемом объеме воздуха имеется определенное количество горячего сухого воздуха из теплообменника или из системы утилизации сбросной теплоты другого технологического процесса. В то же самое время вентилятор подает большое количество рециркулируемого воздуха из сушилки. Объем рециркулируемого воздуха в несколько раз больше объема подаваемого горячего воздуха. Весь этот воздух после тщательного смешивания направляется вниз в медленно вращающуюся воронку с отверстием, через которое он выходит.

Сушилки с регенерированием теплоты. Как было упомянуто ранее в этом параграфе теплота содержится в потоке отработанного воздуха, а также в выходящем из сушилки продукте. С учетом этого и для того, чтобы сделать процессы сушки гранулированных сухих материалов более экономичными, была применена схема, показанная на рис. 6.23. Горячий воздух поступает противотоком к продукту, который само текет движется вертикально вниз. Этот аппарат можно разделить на четыре основные секции:

теплообменник, в котором температуру продукта повышают до температуры горячего воздуха;

приемник, в котором материал поддерживается при той же температуре;

регенератор, в котором теплота материала используется для нагрева воздуха;

расходомер для регулирования количества подаваемого материала.

Нагреватель предусмотрен для дополнительной подачи регенерированной теплоты.

Кривая на рис. 6.24 представляет собой зависимость между КПД регенерации и содержанием влаги в продукте, когда он поступает в теплообменник. Как и ожидалось, КПД регенерации повышался по мере уменьшения содержания влаги, но даже при очень высоком содержании влаги он составил около 30%.

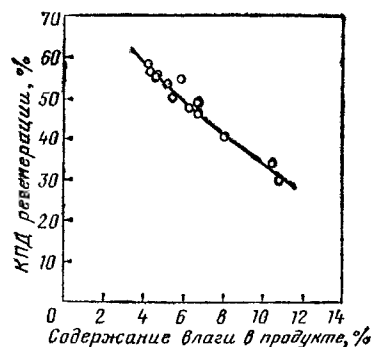
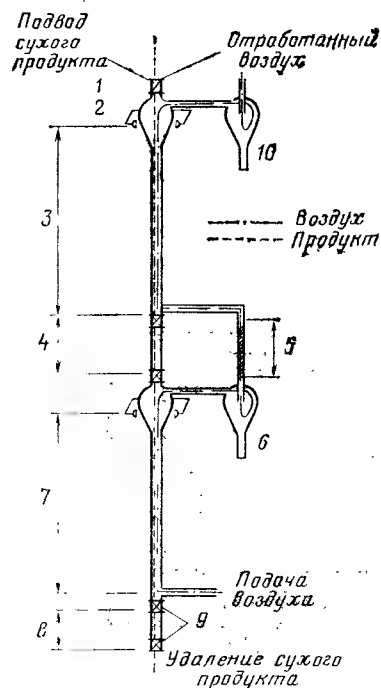


Рис. 6.23. Схема теплообменника для регенерации теплоты сухого продукта:

1 — воронка; 2 — фотоэлектрический регулятор уровня; 3 — теплообменник; 4 — приемник; 5 — нагреватель; 6 — расширительная камера; 7 — регенератор; 8 — измерительная трубка; 9 — шаровые клапаны; 10 — расходомер для регулирования количества подаваемого материала

Рис. 6.24. Влияние содержания влаги на эффективность регенерации теплоты продукта

На основании результатов, полученных в ряде опытов с овсом, молотым зерном и черным перцем, исследователи пришли к следующим выводам:

КПД регенерации зависит от относительных скоростей потока воздуха и продукта. Процесс идет лучше всего при соотношении теплоемкости потоков воздуха и продукта около единицы;

более высокий КПД регенерации может быть достигнут при снижении рабочей температуры сушки;

в аппарате эффективно осушается сорбционное вещество. Регенератор дает возможность дополнительно сушить все продукты с содержанием влаги более 5% до обработки.

Было отмечено, что для исследованных типов материалов нельзя разделять функции сушки и регенерации и в окончательном проекте необходимо в каждом случае устанавливать оптимальное соотношение между КПД регенерации и КПД сушки. Хотя до сих пор эксперименты были сконцентрированы на пищевых продуктах, нет никаких препятствий для использования этой системы для других целей, в особенности когда продукт обладает высокой удельной теплоемкостью.

Тепловые насосы в процессах сушки. Применение теплового насоса для этих целей показано на рис. 6.25. Влажный воздух, отводимый из сушилки, проходит через испаритель теплового насоса, где он охлаждается, отдавая теплоту рабочему телу теплового насоса. В результате охлаждения содержащаяся в воздухе влага конденсируется и удаля-

ется. Теплота, приобретенная в испарителе, и теплота сжатия в компрессоре теплового насоса используются для нагрева сухого воздуха, который вновь поступает в сушильную камеру.

Тепловой насос — это одна из систем, которую исследовательский центр по электроэнергии в г. Кэйпенхерст (Великобритания) (гл. 7) рекламирует как наиболее эффективный путь использования электроэнергии и которая до сих пор была сравнительно редким потребителем первичных источников энергии. С помощью теплового насоса можно получить в 3 раза больше теплоты в конденсаторе, чем подводимая энергия для компрессора, т. е. коэффициент преобразования равен 3.

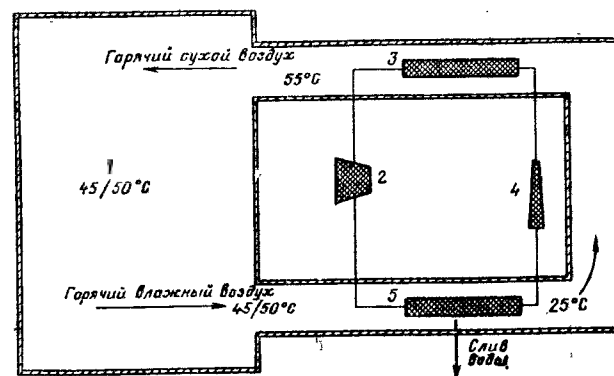


Рис. 6.25. Применение теплового насоса в процессе сушки:

1 — сушильная камера; 2 — компрессор; 3 — конденсатор; 4 — дроссель; 5 — испаритель

Таким образом, тепловой насос с компрессором, приводимым в действие с помощью электродвигателя, будет иметь с точки зрения утилизации первичных источников энергии КПД около 100% (с учетом КПД электростанции 33%).

В настоящее время исследования направлены на разработку сушилок с температурой в камере до 85 °С, но в будущем эта температура будет повышена более чем до 100 °С [6.15].

Сушилки с кипящим слоем. Многие небольшие фирмы или фирмы средних размеров, которым необходимы сушилки, не заинтересованы в непрерывном производстве, поскольку это не всегда соответствует характеру технологического процесса или не оправдано с экономической точки зрения. В этих случаях потребителю нужна такая сушилка, в которой можно эффективно сушить продукты порциями, и поэтому требованию вполне удовлетворяет сушилка с кипящим слоем [6.16].

Процесс сушки может быть значительно ускорен, если подвергаемый сушке материал имеет большую площадь поверхности по сравнению с его массой. Так, если материал может быть измельчен на отдельные частицы, то это облегчает процесс сушки. Это — основной принцип сушки распылением (применяемой на больших заводах) и сушки в кипящем слое. В процессе сушки в кипящем слое основная задача — суспендировать влажные частицы в вертикальном потоке воздуха, под-

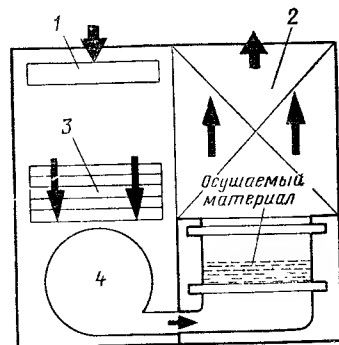


Рис. 6.26. Сушилка с кипящим слоем:
1 — фильтр на входе; 2 — фильтр на выходе; 3 — нагреватель; 4 — вентилятор

вергая таким образом максимальную площадь поверхности частиц принудительной конвекции воздухом.

Показанная на рис. 6.26 сушилка с кипящим слоем может быть применена для периодических процессов, когда в одной сушилке с производительностью около 1 т/ч можно обрабатывать различные продукты.

В этом типе сушилок, который находит широкое применение в фармацевтической, пищевой и химической промышленности, можно использовать для нагрева воздуха пар или продукты сгорания топлива. Стандартная рабочая температура для некоторых типов сушилок равна 120°С, а для защиты окружающей среды от загрязнения предусмотрены системы вторичной фильтрации адсорбции углем.

Указанный тип сушилки представляет особый интерес с точки зрения утилизации теплоты. Как видно из рис. 6.26, всасывающий и вытяжной каналы примыкают друг к другу. Оптимальным типом теплообменника для утилизации сбросной теплоты в такой сушилке, предотвращающим попадание конденсата, образовавшегося в результате охлаждения отработанного воздуха, обратно в продукт, подвергаемый сушке, является теплообменник с тепловыми трубами. Если применить

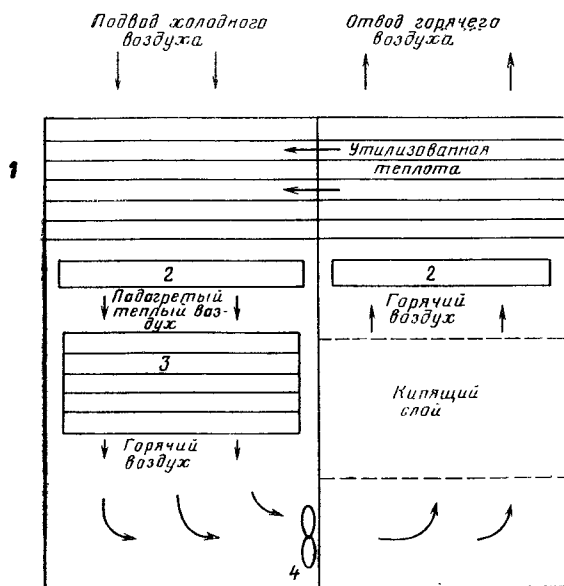


Рис. 6.27. Применение теплообменника с тепловыми трубами над сушилкой с кипящим слоем:

1 — теплообменник с тепловыми трубами; 2 — фильтр; 3 — нагреватель; 4 — вентилятор

схему, показанную на рис. 6.27, то расход энергии, который на больших установках составляет $7,5 \cdot 10^{-2}$ кг/с пара, снизится более чем вдвое.

Для нагрева воздуха в сушилке может быть использована теплота уходящих газов котлов. В этом случае оптимальным может оказаться применение теплообменника с кольцевым змеевиком.

6.5. Печи

Печи значительно отличаются в разных отраслях промышленности по размерам, температурному режиму, организации процесса горения, видам используемого топлива и рабочему циклу. Поэтому, вероятно, неправильно рассматривать такие вопросы, как утилизация теплоты и новые методы плавки, применительно только к одной отрасли промышленности. Например, в гл. 3 рассмотрено применение керамических рекуператоров в металлургии. Эти установки в настоящее время наиболее широко применяются именно в этой отрасли промышленности, для которой повышение эффективности использования топлива в печах имеет очень большое значение.

К керамическим печам предъявляются специальные требования в зависимости от вида обрабатываемого сырья. Такие печи, как правило, непрерывного действия; сырье в них движется по транспортеру от одного конца к другому. Печи периодического действия применяются для высокоскоростных режимов обработки, а миксерные печи — для выдержки материала в расплавленном состоянии в течение длительного периода времени.

Тепловые потоки в печах. Схемы тепловых и материальных потоков в печах периодического и непрерывного действия приведены на рис. 6.28 и 6.29 [6.17]. В печи периодического действия сырье подогревается непосредственно в печи. Основные потери теплоты связаны с продуктами сгорания топлива, уходящими через дымовую трубу. (Другие потери теплоты показаны на рисунке, а способы сведения их до минимума рассмотрены в гл. 5.) Теплота газов может быть использована

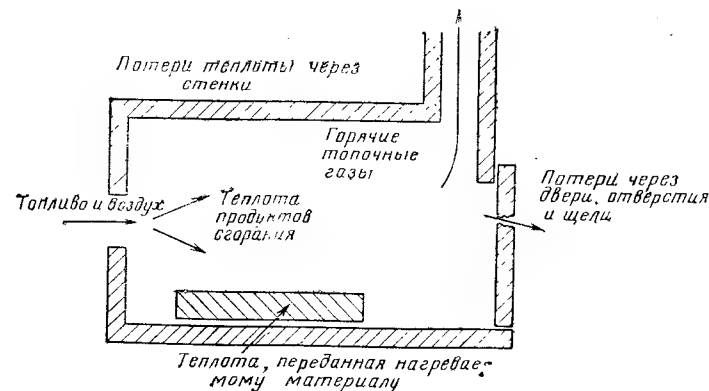


Рис. 6.28. Потоки теплоты в печи периодического действия

для предварительного нагрева воздуха, поступающего в зону горения, с применением рекуператоров, для получения пара с использованием котла-утилизатора (гл. 7), а также для предварительного нагрева сырья до поступления его в печь.

Печи непрерывного действия, применяемые главным образом для термообработки, имеют большие возможности утилизации теплоты непосредственно внутри самой печи. Некоторые из этих возможностей показаны на рисунке. Холодный воздух, поступающий в печь, может быть использован для охлаждения готовых изделий и далее в качестве воздуха для горелок печи, а горячий отработанный газ поступает для предварительного нагрева обрабатываемых изделий.

Печи периодического действия, нагреватели для вагранок. В чугунолитейных цехах произошел переход от рекуператоров к прямому сжиганию ваграночных газов при использовании кокса или природного газа. Как уже отмечалось, характер состава отработанных газов может влиять на срок службы рекуператора, поэтому в некоторых случаях необходимо применение керамических материалов. Эксплуатационные расходы будут высокими, если требуются затраты на защиту окружающей среды от загрязнений. С учетом этого определено, что применение рекуператоров на вагранках экономически менее выгодно, чем применение нагревателей с прямым воспламенением. Другими словами, расходы на стоимость топлива при работе вагранки компенсируются экономией, полученной при ее эксплуатации (на основании действующих цен на топливо и трудовые затраты).

На рис. 6.30 показан в разрезе нагреватель вагранки фирмы Wellman Incandescent Furnace Co. Ltd. При прохождении газов из камеры горения через форсунку в смеситель скорость их возрастает. При этом часть отработанных газов движется противотоком вдоль наружного кольцевого пространства, охлаждая газы в основном теплообменнике до допустимой температуры. Вдуваемый воздух проходит по трубам, расположенным в кольцевом пространстве, а горячие продукты горения, проходя над этими трубами, нагревают воздух, который затем поступает в печь. В этих нагревателях применяются U-образные трубы, благодаря которым решаются проблемы термического расширения. КПД нагревателей вышеописанного типа составляет около 80 %, а температура воздуха на выходе — около 500 °С.

Основной экономии на вагранках достигают благодаря применению

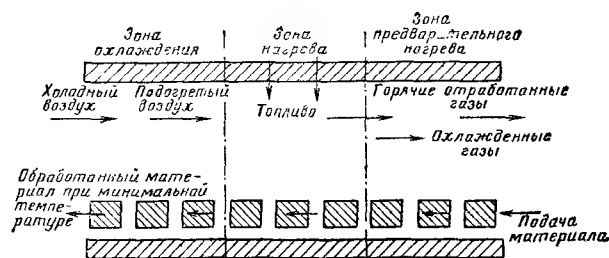


Рис. 6.29. Схема печи непрерывного действия

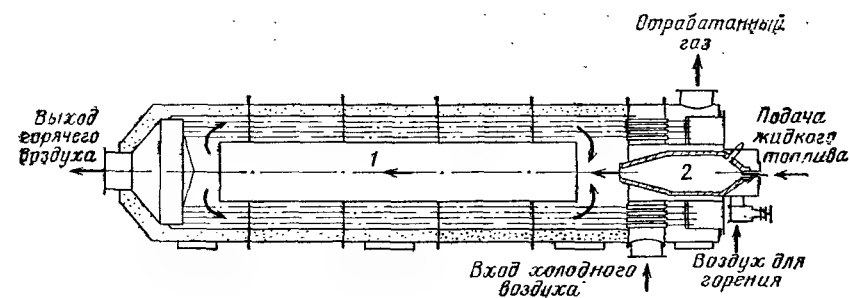


Рис. 6.30. Нагреватель вагранки доменной печи фирмы Wellman Incandescent Furnace Co. Ltd.:

1 — рециркуляционный канал; 2 — камера сгорания

распределенной системы подачи дутья в печь, разработанной фирмой British Cast Iron Research Association (BCIRA). В этой системе [6.19, 6.20], которая применяется в печах, работающих на коксе, воздух, необходимый для сжигания кокса, продувают в вагранку через два ряда фурм, расположенных на соответствующем расстоянии друг от друга, а не через одну фурму. Разделенная струя нагнетаемого воздуха (каждый ряд принимает 50 % горячего воздуха из нагревателя) приводит к сокращению расхода кокса в некоторых вагранках на 30 % и, кроме того, обеспечивает увеличение выпуска расплавленного железа на 25 %.

Капитальные затраты, связанные с реконструкцией существующих вагранок, незначительны по сравнению с получаемой экономией. По сообщению BCIRA период окупаемости в одном литейном цехе (Великобритания) составил всего 14 недель. Крупный литейный цех в Канаде получил экономию 170 тыс. долл. за один год при затратах на реконструкцию 18 тыс. долл. Снижение расхода кокса на 1 т чугуна дает дополнительные преимущества, связанные с более низким содержанием серы, что устраняет необходимость в установке обессеривания, и с выходом чугуна более высокого качества.

Замена вагранки электроплавкой. Комитет Electricity Council в последнее время рекламирует замену вагранок на больших чугунолитейных заводах дуговой электропечью или бессердечниковой индукционной печью [6.21]. В дуговой печи электроды вставляют в камеры через свод печи; при образовании дуги теплота выделяется непосредственно при прохождении тока через шихту, а также излучением от дуги и электродов. На некоторых установках шихту нагревают перед подачей в печь [6.22]. Такие печи надежны, и материал для шихты может быть самым дешевым.

Нагрев и термообработка. Термические и нагревательные печи применяются на более поздней стадии производства для получения литья, обработки металла с целью улучшения его свойств или для удовлетворения требований в определенной области их применения.

В нагревательных печах сталелитейной промышленности слябы и сутунки нагревают до температуры около 1200 °С перед прокаткой. Этот нагрев осуществляют с помощью электрической энергии, жидким

5*

или газообразным топливом с одновременным отводом сбросной теплоты, которую можно частично утилизировать. В СССР широко применяются рекуперативные теплообменники в нагревательных печах, работающих на газовом топливе [6.23], а в Японии фирма Kawasaki Heavy Industries разработала рекуперативную нагревательную систему для нагревательных печей, работающую на жидком топливе. При утилизации теплоты отработанных газов для подогрева воздуха, направляемого воздухоподувкой через ряд сопел на сутунки в нагревательной камере, экономия энергии достигает 20%. Эта система, установленная на нагревательной печи производительностью 300 т/ч, может дать экономию, эквивалентную 865 тыс. долл в год.

Значительную экономию энергии в течение всего цикла от закладки руды до получения готового продукта может давать правильное проведение процесса.

Нехватка природного газа в США вызвала необходимость поиска путей экономии энергии и в других процессах термообработки [6.25], при которых газообразное топливо с низкой теплотой сгорания заменяет природный газ. Фирма Sunbeam Equipment разработала печь для цементации с днищем подковообразной формы; загрузочное отверстие в закалочном отделении обращено к разгрузочному отверстию отделения отпуска. Отработанные газы при температуре 900 °С идут по борovu из закалочного отделения в отделение отпуска, при этом энтальпия продуктов горения больше, чем ранее получаемой теплоты в этом процессе. Это дает 35% экономии стоимости топлива. На некоторых заводах применяются нагревательные печи, работающие на низкокалорийном газе, а на загруженных термических печах поддерживают более низкую температуру (730 °С) для сохранения теплоты, аккумулируемой печью.

6.6. Печи для сжигания отходов

Эти печи до настоящего времени применялись для сжигания отходов, которые не могли быть использованы в каком-либо процессе для других целей. Сжигаемый материал может быть в виде газа, жидкости или твердого вещества. Печи для сжигания газов предназначены для защиты атмосферы от ядовитых или вредных веществ. Печи для сжигания жидких отходов могут быть использованы для удаления органических примесей и регенерации неорганических. Наиболее широкое применение имеют печи для сжигания твердых отходов. Это могут быть компактные печи для сжигания нескольких килограммов отходов в час и очень большие печи для сжигания всех бытовых и промышленных отходов в крупных городах.

Многие производители этих печей предлагают в настоящее время различное оборудование для утилизации сбросной теплоты. В этом параграфе будут рассмотрены применяемые в настоящее время системы и описаны некоторые печи для сжигания отходов, выпускаемые в промышленных масштабах.

Печи для сжигания газов. Газы, загрязняющие окружающую среду и определяемые по запаху или визуально, в основном углеводороды, сжигают в печах двух основных типов: термических и каталитических.

Печь, показанная на рис. 6.31, состоит из трех основных частей: камеры поступления обезвреживаемого газа, горелки и топочной камеры. Печь, показанная на рисунке, была разработана в США фирмой Hirt — Hygrotherm. Она обеспечивает нормальное сжигание газов и характеризуется низкими эксплуатационными расходами [6.26]. Часть поступающих газов проходит через горелку и используется в качестве воздуха для горения, что дает экономию до 30% затрат на топливо. Важной характеристикой печи является конструкция горелки, в данном случае применяется горелка с коротким широким пламенем, имеющим плоскую форму. Направляя газы вдоль фронта пламени по мере их поступления в печь, достигают быстрого нагрева, гарантирующего эффективное окисление сжигаемых газов. Другой важной характеристикой является наличие порогов в печи, которые обеспечивают высокую турбулентность и соответственно повышение эффективности сжигания. При этом большое значение имеет правильное соотношение между количествами продуктов сгорания топлива и газа, который сжигается.

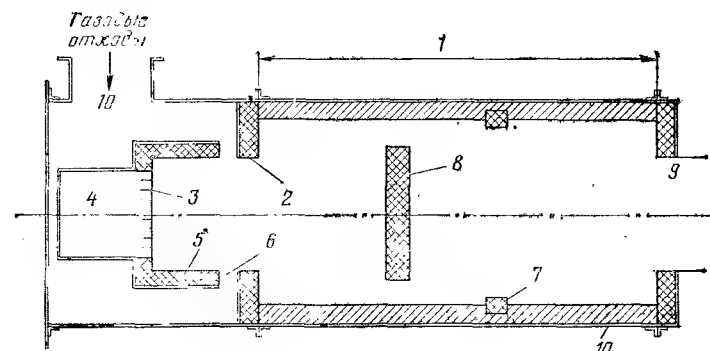


Рис. 6.31. Печь сжигания газовых отходов фирмы Hirt — Hygrotherm:

1 — камера сжигания отходов; 2 — входная диафрагма; 3 — горелки; 4 — воздушный короб; 5 — камера зажигания из огнеупорного кирпича; 6 — воздушный зазор; 7 — кольцо; 8 — перегородка; 9 — выход из печи сжигания; 10 — кожух; 11 — входной коллектор

Целесообразность использования печей этого типа заключается в значительном сокращении потребности в топливе. Система, показанная на рис. 6.32, с печью фирмы Hirt — Hygrotherm была внедрена для сушки покрытий алюминиевой фольги. Эти печи работали на газе, а загрязненный органическим растворителем воздух выбрасывался непосредственно в атмосферу. В новой системе отработанный газ из печи 6 поступает в общий газосборник 5. Регуляторы давления обеспечивают нормальную работу системы при различной нагрузке. Вытяжной канал соединен с дутьевым вентилятором, который нагнетает газы через теплообменник 2, где температура их повышается до поступления в печь. После камеры сгорания 1 топочные газы снова попадают в теплообменник 2, проходят через два воздухоподогревателя 3 и 4 и отводятся через дымовую трубу. Воздух нагнетается дутьевыми вентиляторами в камеры 7 и 8.

Контроль за температурой в печи осуществляется с помощью следящей системы. Система регулирования позволяет работать как на газообразном топливе, так и с использованием теплоты сгорания загрязненного органическими растворителями воздуха. Контроль за тем-

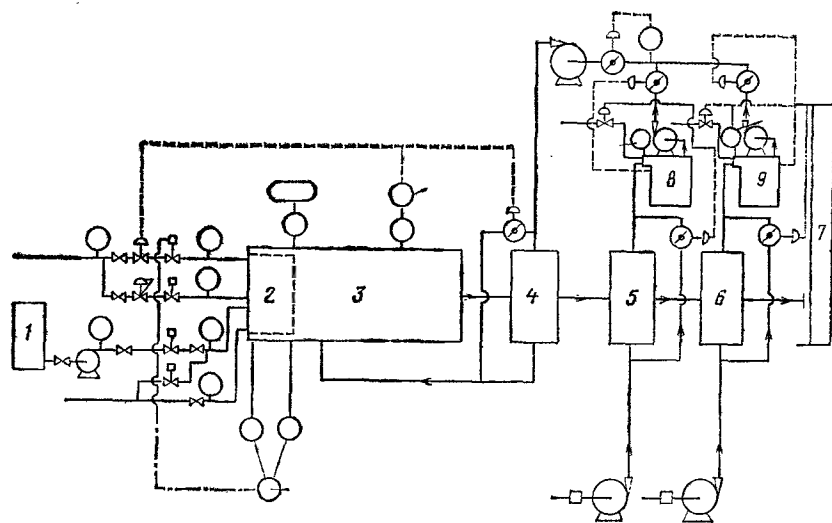


Рис. 6.32. Схема сжигания газовых отходов фирмы Hirt — Hygrotherm с использованием их в качестве источника теплоты для печей:

3 — камера для сжигания отходов; 4 — подогреватель; 5, 6 — нагреватели свежего воздуха; 2 — входной коллектор; 1 — печь для сушки фольги; 8, 9 — печи; 7 — дымовая труба

пературой в отдельных печах достигается также путем изменения положения заслонки в отводной трубе вокруг теплообменника, а также клапана для подачи топлива к горелке. Обычно всю необходимую теплоту обеспечивают теплообменники, а топливо требуется только на период розжига.

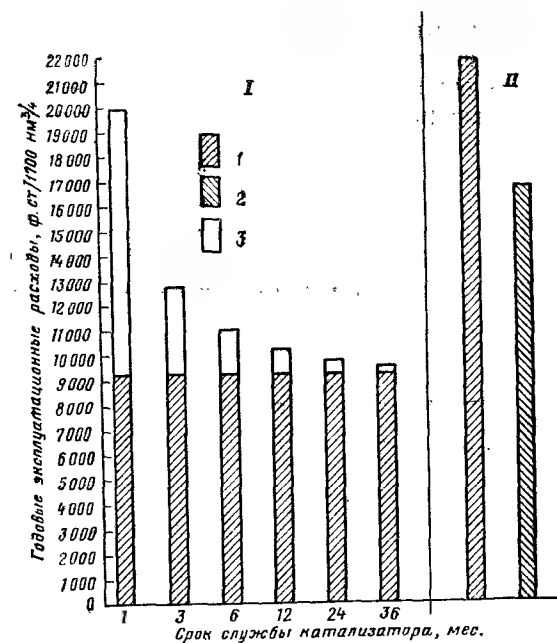
При общей потребности в тепле для нагрева поступающего в печь воздуха 21,8 ГДж в час применение описанной системы обеспечивало поступление 19,7 ГДж в час, т. е. 90% общей потребности, при этом температура в печи была 700 °С, а выбросы в атмосферу имели предельно допустимую концентрацию.

Более эффективны установки фирмы Hirt — Hygrotherm, в которых сбросная теплота утилизируется для предварительного нагрева газа и далее органического теплоносителя (масла), который в свою очередь используется для нагрева воздуха, устраняет необходимость в дорогостоящих трубопроводах, вентиляторах большой производительности и обеспечивает гибкость в работе установки.

Не во всех печах для сжигания газов можно сжигать органические отходы. Например, двуокись серы (SO_2) — наиболее распространенные вредные выбросы, образующиеся в котлах, работающих на органическом топливе, печах обжига и т. д. Одним из путей их уменьшения является удаление из топлива большей части содержащейся серы, но в неко-

Рис. 6.33. Сравнение эксплуатационных расходов для каталитической и термических печей:

I — каталитическое сжигание при 350° С, число часов работы в году 8000; II — сжигание в термических печах при 750° С; 1 — газойль; 2 — нефть; 3 — катализатор



торых процессах десульфуризации образуется сернистый водород (H_2S), который сам по себе является токсичным газом [6.27].

В процессе сжигания H_2S с последующим регулируемым охлаждением, приводящим к каталитической реакции, можно получить чистую серу. Регулируемое охлаждение можно осуществлять путем подачи сбросной теплоты из котла в камеру для сжигания. На нефтеперерабатывающем заводе в США производительностью 22,7 тыс. т в сутки отработанные газы из процесса десульфуризации охлаждают в четыре стадии с температуры 1393 до 191 °С, затрачивая 21,6 ГДж/ч. Количество получаемого при этом насыщенного пара равно 2,65 кг/с, температура питательной воды 118 °С. Это дает экономию нефти, эквивалентную 200 тыс. долл. в год, к которой необходимо еще добавить стоимость регенерированной серы.

Если обычную термическую печь для сжигания газов нельзя оборудовать утилизационной техникой, то предпочтительно применение каталитической печи. Катализатор ускоряет скорость химической реакции, не изменяясь сам во время процесса. Применение катализаторов в печах для сжигания газов может ускорить реакцию окисления, необходимую для преобразования органических веществ в углекислый газ и водяной пар. Поскольку сжигание газов с катализатором происходит при гораздо более низкой температуре (250—350° С по сравнению с 500—1000° С в термических печах), количество необходимой теплоты для обезвреживания газов значительно сокращается.

Сравнение эксплуатационных расходов для каталитической и термической печей, которое дает фирма Engelhard, приводится на рис. 6.33. Каталитическая печь работает при температуре 350° С, в то время как в такой же термической печи температура должна достигать 850 °С для нормального сжигания газов. Принимается во внимание и срок службы катализатора. Отмечено, что несмотря на то что срок службы 3 мес нетипичен, все равно достигается экономия эксплуатационных расходов по сравнению с термическим обезвреживанием.

Фирма Engelhard проявляет большой интерес к системам утилизации теплоты, применяемым именно для этих печей, особенно если в этих печах предусмотрен предварительный нагрев поступающих газов. При применении эффективной системы утилизации теплоты обычно достигают 50%-ного снижения затрат на топливо и периода окупаемости 12 мес.

Печь для сжигания жидких отходов. Аргументы в пользу утилизации сбросной теплоты печей сжигания жидких отходов такие же, как и для обычных термических печей сжигания газовых отходов. Сжигаемым материалом может быть отработанный катализатор или жидкости, содержащие органические и неорганические вещества. При этом имеется также возможность регенерации неорганических солей.

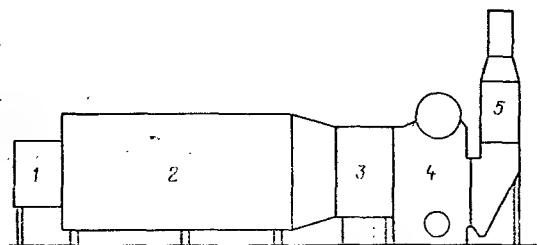


Рис. 6.34. Печь для сжигания жидких отходов:

1 — горелка для сжигания жидких отходов; 2 — печь; 3 — подогреватель; 4 — котел-утилизатор; 5 — экономайзер

Печь для сжигания жидких отходов с большой установкой утилизации теплоты показана на рис. 6.34. В этой печи 22,9 кг/с отработанного газа охлаждается с температуры 1200 °С (печи для сжигания жидких отходов часто работают при более высокой температуре, чем печи для сжигания газов) до температуры 168 °С. Количество перегретого пара с давлением 1,930 МПа и температурой 400 °С равно 10,4 кг/с [6.27]. Экономия топлива в денежном выражении составляет 500 тыс. ф. ст. в год.

Разработанная японской фирмой Nittety Chemical Engineering и внедренная в Великобритании фирмой Henry Balfour печь для сжигания жидких отходов снабжена горелкой, расположенной в верхней части основной камеры над форсунками для разбрызгивания обезвреживаемой жидкости. Продукты горения и реакции поступают вниз в закалочную ванну, в которой газы охлаждаются примерно до 90 °С. Содержимое закалочной ванны можно обработать путем кристаллизации, фильтрации и сушки, если необходимо регенерировать материалы. Сбросная теплота может быть использована для предварительного нагрева воздуха, поступающего в зону горения, или в испарителе для испарения поступающей жидкости [6.28].

Печи для сжигания твердых отходов хорошо известны, и их использование для получения теплоты и энергии описано в технической литературе [6.29, 6.30]. Как показано ниже, твердые отходы содержат большое количество энергии, и если они не могут быть вторично использованы, то экономичным решением проблемы их обезвреживания являются печи сжигания с утилизацией сбросной теплоты:

Отходы

Содержание эквивалентного количества жидкого топлива в 1 т отходов

Пыль	86
Бумага (15% влаги)	286
Древесина (20% влаги)	323
Поливинилхлорид	524
Уголь (с теплотой сгорания 27 900 кДж/кг)	656
Полистирол	870
Каучук	955

Современная печь для сжигания твердых отходов с различным вспомогательным оборудованием показана на рис. 6.35. Эта установка, известная под названием Consumat и изготовленная фирмой Robert Jenkins Systems Ltd., имеет камеру сгорания с огнеупорной футеровкой, в которую поступают твердые отходы и подается воздух. Первоначально отходы нагревают с помощью небольших вспомогательных горелок, и они подвергаются процессу пиролиза при температуре до 800 °С. По сравнению со сжиганием, проводимым в присутствии больших количеств воздуха, этот процесс дает возможность разлагать отходы при стационарном режиме, сокращая таким образом унос частиц в дымовую трубу.

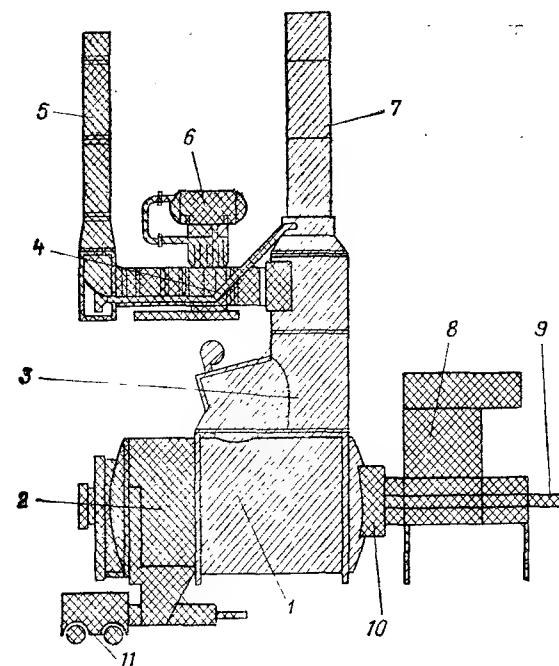


Рис. 6.35. Печь для сжигания твердых отходов фирмы Consumat:

1 — основная камера; 2 — автоматическое удаление золы (по требованию); 3 — камера контроля за загрязнением; 4 — котел-утилизатор; 5 — дымовая труба котла; 6 — барабан котла; 7 — дымовая труба печи; 8 — автоматическая подача отходов (по требованию); 9 — загрузочное устройство (по требованию); 10 — воздушная завеса (по требованию); 11 — сборник золы (по требованию)

Для дополнительной защиты окружающей среды от загрязнения твердые частицы, содержащиеся в уходящих газах, окисляют путем нагрева до температуры 1000—1200 °С, используя небольшую горелку. Затем газы охлаждаются до температуры 800 °С путем смешивания их с холодным воздухом до сброса в атмосферу.

Как показано на рис. 6.35, к газоходу может быть присоединена система утилизации сбросной теплоты газов для получения горячей воды или пара. Система *Consumat* с небольшими модификациями может быть использована для сжигания жидких отходов. Утилизационная установка может иметь производительность 3,5 т пара на 1 т обезвреживаемых

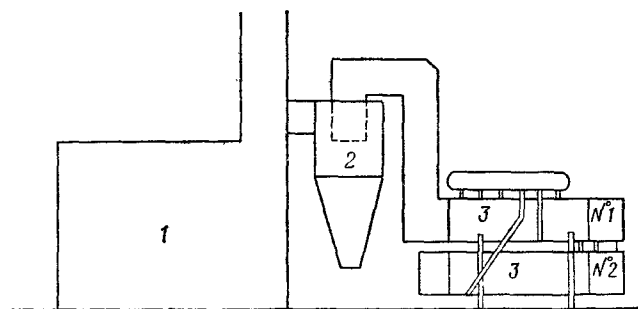


Рис. 6.36. Применение циклонного сепаратора для защиты котла-утилизатора от загрязнения:

1 — печь для сжигания твердых отходов; 2 — циклонный сепаратор; 3 — котел

отходов. Фирма считает, что утилизация энергии становится экономически выгодной, если количество отходов превышает 150 кг/ч. Обычно утилизируют 50—60% теплоты, используемой для сжигания отходов. При необходимости в основную камеру сжигания могут подаваться и жидкие отходы. Так как в печах для сжигания твердых отходов используют большие объемы воздуха, то для уменьшения переноса твердых частиц необходимо между камерой сгорания и оборудованием для утилизации теплоты устанавливать сепаратор (рис. 6.36). В этих случаях [6.27] необходимо применять паровые котлы с дымогарными трубами и высокими скоростями газа для предотвращения осаждения неотсепарированных твердых частиц.

В США опубликован детальный анализ загрязнения парового котла на отходящих газах, установленного в нижней части печи для сжигания различных жидкостей [6.31]. Температура отходящих газов на выходе из вторичной камеры сжигания колебалась в пределах 800—1150 °С из-за изменения состава отходов, частью которых был хлорированный растворитель. При сжигании этих отходов получали хлористый водород, содержание которого в отработанном газе составляло 0,1—5% (по массе). Хлористый водород вместе с летучей золой и был основным источником загрязнения. После 600 ч испытаний было установлено, что экранные трубы котла из углеродистой стали вполне удовлетворительно выдерживают режим работы при условии регуляр-

ных продувок котла и очистки поверхностей труб. Был рекомендован минимальный диаметр труб 75 мм, поскольку трубы меньшего диаметра подвержены большему загрязнению. Анализ данных по летучей золе показал, что циклон, установленный в верхней части котла, так же как и в печи, показанной на рис. 6.36, значительно сократил бы степень повреждения и загрязнения труб. Было также предложено поддерживать сравнительно высокую скорость газа (20—30 м/с) в котле, чтобы свести до минимума осаждение золы на поверхностях нагрева.

6.7. Теплообменники с высокотемпературными теплоносителями

Высокотемпературный теплоноситель, обычно органическое вещество, имеет температуру кипения выше температуры кипения воды (в пределах от —50 до 400 °С), и в связи с этим нет необходимости осуществлять процесс нагрева в теплообменнике под давлением, как это

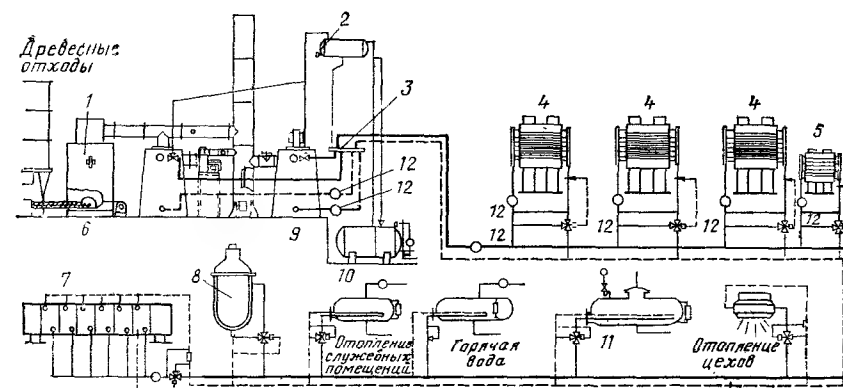


Рис. 6.37. Схема использования отходов для нагрева жидкого теплоносителя:

1 — камера сгорания; 2 — расширительный сосуд; 3 — сепаратор; 4 — пресс; 5 — рабочий пресс; 6 — нагреватель; 7 — сушилка; 8 — резервуар для плавления; 9 — нагреватель; 10 — отстойник для горячей воды; 11 — парогенератор; 12 — насосы

имеет место при использовании в качестве теплоносителя воды или пара. Одним из примеров таких теплоносителей является Thermax (торговая марка фирмы ICI) — смесь дифенила и дифенилоксида с температурой кипения около 260 °С. Недостатком этих теплоносителей является разложение при высоких температурах, обычно выше температуры их кипения, и подверженность окислению.

Система с использованием древесных отходов для нагрева жидкого теплоносителя, применяемая на заводе по изготовлению фибрового картона, показана на рис. 6.37. В системе имеется три прессы, работающих при температуре 250 °С (700 кВт), сушилка (1500 кВт), резервуар для плавления (116 кВт). Количество отходов дерева в этом процессе равно 450 кг/ч. При этом вырабатывается пар (3 т/ч с давлением 1,8 МПа) и также осуществляется нагрев воды на технологические нужды [6.32].

Теплоту можно было бы также аккумулировать в жидком теплоносителе до тех пор, пока она потребуется.

Органические жидкости, применяемые в теплообменном аппарате приведенного типа имеют ограниченный интервал рабочих температур, а также относительно низкую теплопроводность. Оба эти обстоятельства можно исключить благодаря применению в качестве теплоносителя солей, теплопроводность которых в 2—3 раза выше теплопроводности органических жидкостей и которые стабильны при температуре до 550 °С при очень низкой упругости паров. Эти соли обычно представляют собой смесь нитратов и нитритов. Для получения более высоких рабочих температур могут применяться жидкие металлы. Рабочие температуры теплоносителей приведены ниже:

Теплоноситель	Интервал температур, °С
Вода и пар	0—200
Минеральные масла	—10÷315
Дифенил/дифенилоксида	20—400
Моноэтиленгликоль	—40÷100
Изомеры бензилбензола	—50÷330
Изомеры дибензилбензола	—15÷350
Дифенилметан	200—400
Теплопередающие соли	155—540
Натрий и расплавы металлов	200—700

6.3. Методы регенерации отходов

Выше описаны методы прямого сжигания отходов, но часто можно регенерировать отходы для повторного использования, не разрушая их, путем рециркуляции в процесс или переработки с целью получения другого продукта. Из отходов также может быть получено топливо с более высокой теплотой сгорания, чем у первичных твердых, жидких или газообразных отходов.

Не следует ограничиваться только теми отходами, которые получают на данном заводе. Производители могут получать прибыль от использования отходов, полученных в процессах на другом заводе и даже в другой отрасли промышленности. Однако при регенерации отходов нельзя не учитывать экономических факторов. Установка регенерации может потребовать значительных капиталовложений, а сам процесс может быть связан с еще большими затратами на установку обработки сточных вод, так как вполне возможно, что значительная часть обрабатываемых отходов будет сбрасываться в «нерегенерированном» виде. Очевидно, что стоимость регенерации должна быть достаточно низкой, и необходимо принимать во внимание несколько факторов с точки зрения сохранения энергии:

затраты на энергию при регенерации отходов по сравнению с затратами, необходимыми для получения требуемого материала из природных ресурсов;

выгоду, которую можно получить при рециркуляции, например рециркулируемый газ может улучшить процесс плавки стекла;

необходимость сопоставления преимуществ для данной отрасли промышленности с теми преимуществами, которые могут быть получены в будущем при повторном использовании, например, биологически разлагаемого материала.

Существует целый ряд частных и субсидируемых правительством организаций, занятых регенерацией отходов с целью получения топлива или материала, который можно повторно использовать. Регенерация нефти для вторичного использования и экстракция растворителей из отходов — наиболее общепотребимые процессы в промышленности.

Один из наиболее интересных процессов регенерации связан с применением таких жидких теплоносителей, как Dautherm Thermax. Они могут содержать в виде примесей полимерный материал, налеты сажи, летучие продукты разложения или воду. Поскольку эти теплоносители являются дорогостоящими продуктами и необходимо периодическое заполнение системы свежим теплоносителем, регенерация этих теплоносителей может привести к значительной экономии затрат. Процесс регенерации, разработанный фирмой Crewe Chemicals Ltd., идет в три стадии. Прежде всего удаляют примеси с низкой температурой кипения, например воду, затем проводят дистилляцию под глубоким вакуумом. И, наконец, остатки удаляют путем продувки азотом. В результате получают более 99% чистого продукта.

Обмен отходами в Великобритании. Департамент промышленности в Великобритании с целью наиболее выгодного использования отходов распространяет по всей стране перечни отходов, их количества и мест расположения завода. В эти перечни не включены отходы, которые имеют рынки сбыта, а обычно включены кислоты и щелочи, катализаторы, неорганические химикаты, каучуки и пластмассы.

Организованный через лабораторию Warren Spring в г. Стивнэйдж, этот обмен был начат в октябре 1974 г. В каждом экземпляре бюллетеня помещаются формы ответа читателя с указанием его пожеланий для приобретения или поставки любого из перечисленных отходов. Запросы на определенный материал направляются фирме, располагающей этим материалом, так что заказчик и поставщик могут договариваться между собой с полным соблюдением конфиденциальности.

Этой же лабораторией было начато исследование с целью организации центров по регенерации отходов. На рис. 6.38 показаны процессы, которые в первую очередь должны быть приняты во внимание. Цель этих центров — предоставлять оборудование для обработки отходов, большей частью для регенерации.

Переработка отходов в топливо. Недавно в США [6.33] было проведено исследование и сравнение способов сжигания и пиролиза отходов. Хотя в новых процессах сжигания происходит меньшее разложение, чем в более ранних методах обработки отходов, в которых не было регенерации продуктов, все еще остается проблема загрязнения окружающей среды, поэтому пиролиз представляется более выгодным процессом обработки отходов.

Система, разработанная фирмой Garrett Research Development в Калифорнии, направлена на утилизацию топлива из процессов сжигания городских отходов. Нагревая органические отходы в теплообмен-

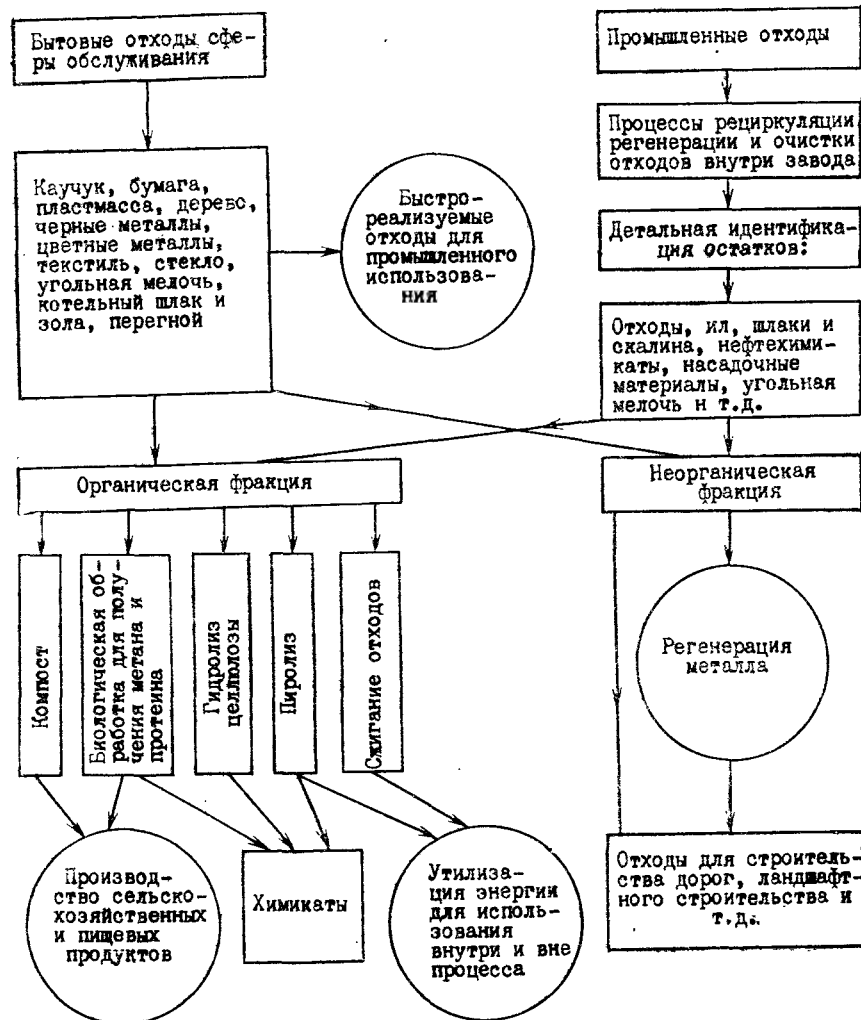


Рис. 6.38. Функции центров по регенерации отходов

нике до температуры 500°C в бескислородной атмосфере, получают 100 л жидкого топлива, 72,5 кг угля и определенное количество газа на каждую тонну отходов. Рециркуляция газа обеспечивает теплоту для процесса пиролиза.

Использование пиролиза и других подобных процессов в промышленных масштабах в ближайшие годы нереально, но они показывают, что городские и промышленные отходы можно обрабатывать с получением максимальной выгоды.

Глава 7

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ СБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ

В предыдущих главах было перечислено большое количество способов утилизации сбросной теплоты и рассматривалось также применение их в целях снижения эксплуатационных расходов и экономии первичных видов топлива. И действительно, после мероприятий по повышению уровня эксплуатации оборудования утилизация сбросной теплоты, возможно, является основным способом экономии энергии, который должен быть внедрен в различных отраслях промышленности.

В данной главе описаны основные способы утилизации теплоты из воздуха, газов и жидкостей, включая применение тепловых насосов. Особый раздел посвящен теплообменникам для тепловых насосов. Кроме того, описан ряд высокотемпературных рекуператоров и регенераторов.

7.1. Теплообменники с тепловыми трубами

Теплообменник, применяемый для утилизации теплоты из газов, представляет собой пучок ребристых труб, собранных в виде обычного охлаждаемого воздухом теплообменника.

Тепловая труба [7.1] представляет собой герметичный контейнер с фитилем. Фитиль содержит рабочую жидкость, которая служит тепло-

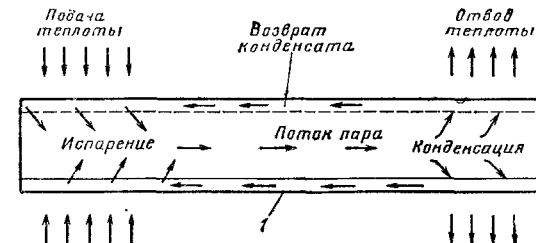


Рис. 7.1. Работа тепловой трубы:

1 — стенка сосуда

передающей средой. Если теплота подается к одному концу тепловой трубы, то жидкость в фитиле на этом конце испаряется, пар поступает к более холодным зонам тепловой трубы, в которых происходит конденсация, и скрытая теплота конденсации отводится (рис. 7.1).

Работа тепловой трубы зависит от наклона ее к горизонтальной линии, размера пор фитиля и поверхностного натяжения рабочей жидкости. Количество передаваемой теплоты определяется также скрытой теплотой рабочей жидкости, которая должна быть как можно выше.

Общее описание установки. В газовом теплообменнике, как показано на рис. 7.2, испарители тепловых труб перекрывают канал, по которому поступает

горячий газ, а конденсаторы расположены в канале, в котором теплота от горячего газа передается холодному поступающему, воздуху. Для максимальной эффективности теплообмена предпочтительно, чтобы воздух поступал через теплообменник противотоком.

Обычно тепловые трубы монтируются в горизонтальном положении, а два канала соприкасаются в том месте, где расположен теплообменник. Одна американская фирма, производящая теплообменники, запатентовала систему регулирования, в которой изменение показателей работы тепловой трубы в зависимости от наклона к горизонту может быть использовано для регулирования переноса теплоты. При наклоне всей установки так, чтобы испарители были выше конденсаторов, передача теплоты может быть постепенно сведена к нулю. Это дает возможность регулировать температуру нагреваемого газа в зависимости от изменений температуры окружающего или отработанного воздуха. Материал

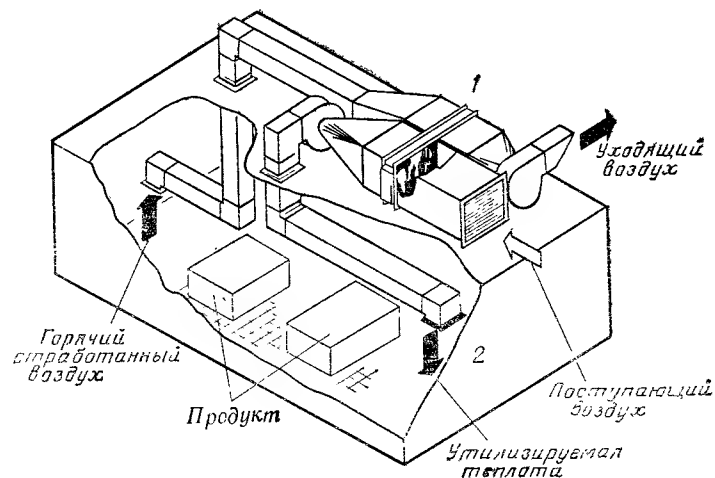


Рис. 7.2. Расположение в печи теплообменника с тепловыми трубами для утилизации теплоты:

1 — теплообменник с тепловыми трубами (TRU-300); 2 — печь

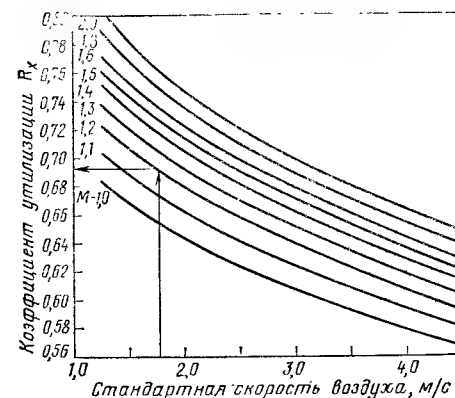
лы и рабочие жидкости, применяемые для теплообменников с тепловыми трубами, в большей степени зависят от пределов рабочих температур. Что касается наружной поверхности трубок и ребер, то выбор металла зависит от среды, в которой должна работать эта установка. Рабочими жидкостями в системах кондиционирования воздуха и в других случаях, когда рабочая температура не превышает 40° С, являются фреон и ацетон. При увеличении температур наилучшей жидкостью является вода. Для очень горячих отработанных газов в печах могут применяться высокотемпературные органические жидкости.

В большинстве случаев трубы выполняют из меди или алюминия. Если газ содержит кислотные примеси или если требуется более высокая температура, то применяется более надежный материал; для этих целей обычно выбирают нержавеющую сталь.

Пучок труб может быть изготовлен из имеющихся готовых спирально намотанных оребренных труб или может быть выполнен в виде холодильного змеевика, при этом трубки вытянуты в виде пластины, образующих прямоугольное ребро, опущенное в глубь теплообменника. Последний вариант предпочтителен в отношении стоимости.

Размер теплообменника принимается в зависимости от производительности, скорость газов обычно допускается в пределах 2—4 м/с. Небольшие теплообменники имеют 0,3 м в высоту и 0,6 м в длину, а более крупные — соответственно 1,5

Рис. 7.3. Показатели работы теплообменника с тепловыми трубами



и 5 м. Количество рядов трубок в направлении потока газа редко превышает восемь, обычно это четыре—шесть рядов, хотя в некоторых случаях теплообменники устанавливаются последовательно.

Эффективность. Теплообменники с тепловыми трубами обладают меньшим КПД, поскольку тепловая труба по существу создает дополнительное термическое сопротивление по сравнению с другими типами теплообменников, в которых одна стенка разделяет холодный и горячий потоки теплоносителя.

КПД или коэффициент утилизации теплообменников с тепловыми трубами зависит от количества ребер в тепловых трубах, количества рядов трубок, скорости и плотности газа и соотношения расходов массы двух потоков газов. На рис. 7.3 представлены коэффициенты утилизации для теплообменника с шестью рядами оребренных трубок для ряда значений M , представляющих собой соотношение масс потоков. В большинстве случаев площади поверхности теплообменника одинаковые, при этом в центре расположена перегородка, разделяющая два потока газа. Однако в тех случаях, когда значение M велико, площадь поверхности испарителя и конденсатора может быть отрегулирована передвижением разделительной перегородки, так что скорость и, следовательно, падение давления в канале, по которому поступает максимальная масса потока, снижается.

В настоящее время теплообменники с тепловой трубой могут работать при температуре отходящего газа до 350° С, однако имеются специальные дорогостоящие теплообменники, в которых температура может быть даже выше. Применение таких теплообменников в системах, в которых максимальная температура может превышать 400° С, приводит к необходимости использования жидкого металла в качестве рабочей жидкости в тепловой трубе, что ведет к значительному повышению стоимости.

Применение. Теплообменники с тепловыми трубами находят широкое применение в промышленности, в системах отопления и вентиляции административных зданий. На основании информации, представленной фирмой $Q = \text{Dot Corporation}$, они используются в настоящее время для регенерации теплоты в отбеливающих печах, печах для обжига кирпича, цепных сушильных печах непрерывного действия, промышленных устройствах сварки, гравитационной и твердой пайки, устройствах для напыления красителей, устройствах получения фармацевтических препаратов, установках фосфатирования, устройствах контроля за загрязнением окружающей среды, в печах для регенера-

ции растворителя, в устройствах для дублирования, в печах восстановления текстиля и в устройствах для утилизации теплоты отработанного пара.

Низкая разница температур обработанного и поступающего в здание воздуха не помешала применению теплообменников этого типа для утилизации теплоты в системах кондиционирования.

В США в связи с более резкими перепадами температур окружающего воздуха, чем в Великобритании, применение этой установки возможно и летом для охлаждения приточного воздуха. В результате, в США вполне возможно утилизировать сбросную теплоту с высоким КПД в течение 8 мес в году. Однако в Великобритании единственным способом их применения является, по-видимому, нагрев приточного воздуха, и по количеству используемой для этих целей теплоты можно сказать, что на многих установках период окупаемости составит более 2—3 лет (пример приведен ниже).

Возможно, что в Великобритании эти теплообменники будут применяться в основном в промышленных процессах. Расчеты показывают, что в ряде случаев период окупаемости составит один год. Этому способствуют температурный уровень утилизируемой теплоты и работа практически в течение всего года.

Подводя итоги, можно утверждать, что тремя основными областями применения теплообменников с тепловыми трубами являются утилизация теплоты для нагрева воздуха или газа, используемого в самом процессе; и утилизация сбросной теплоты процесса для целей отопления или других нужд вне технологического процесса [72, 73].

В некоторых случаях применение теплообменников с тепловыми трубами может потребовать реконструкции, а также удлинения трубопроводов. Это ограничение может быть устранено путем применения пучка вертикально расположенных тепловых труб и расположения испарителей под конденсаторами.

Во многих случаях эти ограничения перекрываются тем преимуществом, что в процессе теплообмена не происходит переноса загрязненных частиц из одного потока в другой. Благодаря разделительной перегородке два потока газа могут иметь различное давление, что невозможно, например, в случае вращающегося регенератора.

Стоимость. Теплообменники утилизации теплоты с тепловыми трубами выпускаются в США в течение нескольких лет. Ниже приведена приблизительная стоимость теплообменников, производимых крупнейшей в этой области фирмой Q-Dot Corporation:

Материал	Стоимость*, $\frac{\text{пенс}}{\text{м}^3/4}$
Алюминий:	
большой агрегат	12
небольшой агрегат	16
Медь:	
большой агрегат	15
небольшой агрегат	21
Нержавеющая сталь:	
большой агрегат	24
небольшой агрегат	32

* Без учета монтажа.

По данным фирмы Q-Dot Corporation период окупаемости для промышленных процессов, в которых происходит глубокая утилизация теплоты и имеет место высокая разница температур, 1—3 года. При кондиционировании воздуха и отоплении период окупаемости выше — в ряде случаев более 5 лет.

На рис. 7.4 показано применение теплообменника с тепловыми трубами, выпускаемого американской фирмой Isothermics.

Количество отработанного воздуха при температуре 220 °С из сушильной печи, работающей на жидком топливе, составляет 64 м³/мин. Мощность печи 500 кВт. При этом необходимо осуществлять нагрев приточного воздуха до 20 °С зимой и технологического воздуха до 90 °С летом. Печь работает в течение 21 ч в сутки. Допустимое падение давления 0,3 кПа.

Теплообменник имеет поверхность $1,0 \times 1,3$ м с четырьмя рядами трубок. Наружный диаметр трубок 19 мм, высота ребра 9,5 мм. Теплообменник выполнен из меди с защитным покрытием из никеля, теплоносителями являются метанол и вода; масса 300 кг, общая стоимость 10 тыс. долл.

Ежегодная экономия топлива эквивалентна 8 тыс. долл.

Дальнейшее усовершенствование этих теплообменников для расширения областей их применения идет в направлении изменения предела

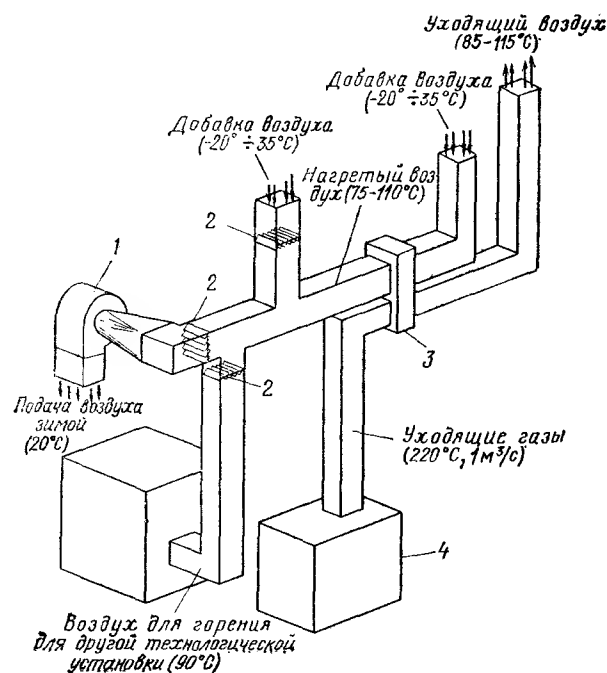


Рис. 7.4. Установка утилизации теплоты с использованием тепловых труб в сушильной печи:

1 — воздуходувка; 2 — заслонка; 3 — теплообменник с тепловыми трубами; 4 — сушильная печь

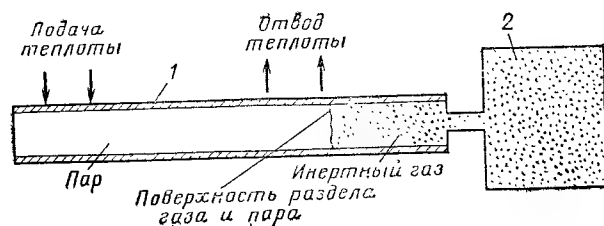


Рис. 7.5. Тепловая труба с буферным газом для регулирования температуры:

1 — фитиль; 2 — резервуар

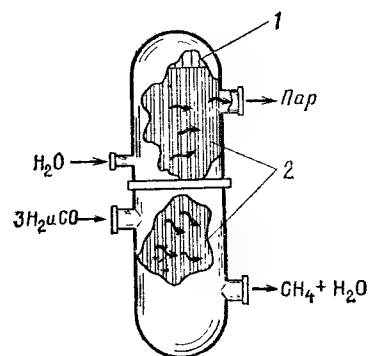


Рис. 7.6. Использование теплообменника с тепловыми трубами в процессе получения метана:

1 — резервуары для газа; 2 — тепловые трубы

рабочих температур и регулирования переноса теплоты [7.4]. Как было упомянуто ранее, верхний предел рабочей температуры в существующих системах — около 350 °С. Применение теплообменников с жидким металлом в качестве теплоносителя возможно в будущем при условии

их массового производства и соответственного снижения стоимости. (В настоящее время ту же самую функцию с более высоким температурным пределом могут выполнять керамические вращающиеся регенераторы).

В существующих системах регулирование переноса теплоты от горячего потока газа к холодному осуществляют путем наклона всего теплообменника, что в целом ряде случаев может оказаться неприемлемым. Гораздо более точного регулирования можно достичь в результате применения тепловой трубы с буферным газом, что лишь незначительно увеличит капитальные затраты. Это дало бы возможность применять эти агрегаты в процессах, для которых температура поступающего воздуха строго фиксирована, а также в системах кондиционирования воздуха, для которых в течение суток она должна изменяться в значительных пределах. В тепловой трубе с буферным газом в отделении конденсации имеется инертный газ. По мере повышения температуры в испарителе упругость паров в тепловой трубе возрастает, что приводит к уменьшению занимаемого газом объема, и соответственно площадь поверхности теплообмена увеличивается. И наоборот, уменьшение теплового потока в испаритель снижает упругость паров, уменьшая поверхность теплообменника, как показано на рис. 7.5.

В процессе получения метана тепловые трубы могут применяться [7.5] для поддержания температуры процесса с одновременным использованием утилизированной теплоты для генерирования пара, как показано на рис. 7.6. В этом процессе теплота выделяется в результате экзотермической реакции между водородом и оксидом углерода

присутствии никеля в качестве катализатора. Благодаря системе с тепловой трубой устраняется необходимость в сложных системах регулирования.

В США проводятся исследования [7.6] по более глубокому изучению условий, влияющих на эффективность работы этих теплообменников, и разработке менее дорогих конструкций. В этих целях была осуществлена оптимизация конструкции теплообменника с помощью расчетов на ЭВМ [7.7] и сравнение расчетных и фактических результатов, полученных на промышленных теплообменниках [7.8].

7.2. Теплообменники с промежуточным (жидким) теплоносителем

Эти теплообменники, называемые иногда изготовителями кольцевыми змеевниками, состоят из двух теплообменных агрегатов, которые связаны друг с другом системой циркуляции жидкого теплоносителя. Основной принцип работы такого теплообменника показан на рис. 7.7. Теплоноситель, который выбирают исходя из предела рабочих температур, нагревается при прохождении через теплообменник, расположенный в потоке отработанного горячего воздуха. Затем теплоноситель подается циркуляционным насосом в теплообменник, расположенный в отдаленном воздуховоде для нагрева холодного воздуха. Далее теплоноситель вновь возвращается в теплообменник, расположенный в потоке отработанного горячего воздуха. При применении такого теплообменника в системах кондиционирования воздуха, когда имеет место небольшая разница рабочих температур теплоносителя, в качестве теплоносителя часто используют водный раствор гликоля.

В [7.9] дано теоретическое обоснование применения таких теплообменников, а ниже рассмотрены только параметры, определяющие КПД этой системы [7.10, 7.11]. Установка утилизации теплоты этого типа была разработана фирмой AB Svenska Flaktfabriken (Стокгольм). Наиболее важные элементы системы — теплообменники и насос — имеют стандартную и надежную конструкцию.

По сравнению с теплообменником с тепловыми трубами основное преимущество системы Ecotherm, как ее называют изготовители, состоит в том, что можно располагать всасывающий и вытяжной каналы на отдаленном расстоянии. Конечно, применение насоса в этой системе снижает надежность системы, а также требует затрат энергии на его привод, однако производители считают, что потребление энергии составляет около 1% утилизированной энергии.

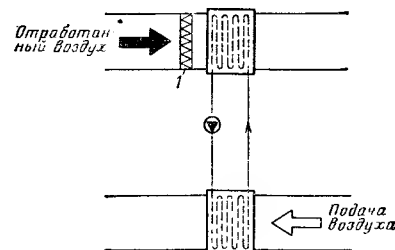


Рис. 7.7. Принцип работы теплообменника с промежуточным теплоносителем:

1 — фильтр; 2 — насос

Тепловой расчет. При расчете этой системы необходимо принять во внимание большое количество переменных, особенно в тех случаях, когда один тепловой контур предназначен более чем для одного всасывающего и вытяжного каналов. По этой причине потребителям рекомендуется обращаться к тем изготовителям, которые располагают программами оптимизации [7.12].

Для данной общей поверхности теплообмена энтальпия теплоносителя (представляющая собой произведение весового расхода и тепло-

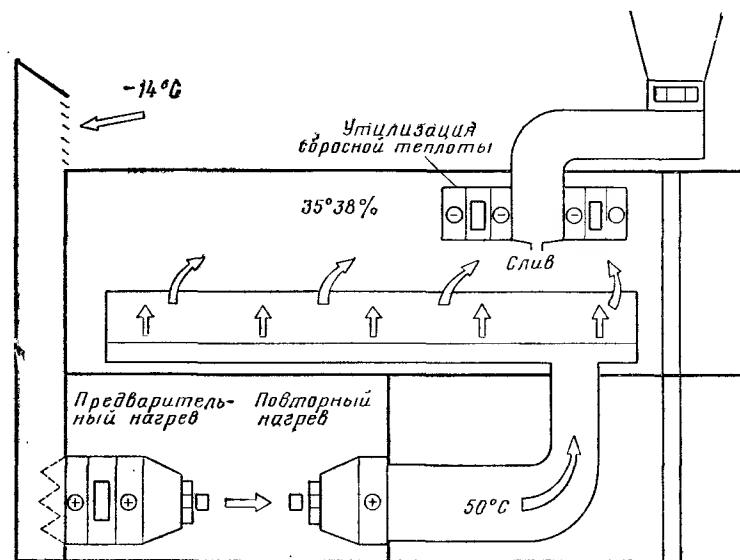


Рис. 7.8. Теплообменники с промежуточным теплоносителем, применяемые для утилизации теплоты на фабрике по изготовлению оболочки для колбасы

емкости), а также соотношение площадей поверхности должны выбираться с учетом максимального термического КПД на стороне подаваемого на нагрев воздуха.

Термический КПД теплообменника этого типа определяется как

$$\eta_{\text{т}} = \frac{t_2 - t_1}{t_{\text{отр}} - t_1},$$

где t_1 — температура поступающего воздуха на входе; t_2 — температура воздуха на выходе; $t_{\text{отр}}$ — температура отработанного воздуха на входе.

Термический КПД обычно составляет 45—65% и зависит также от содержания влаги в отработанном воздухе и соотношения потоков поступающего и отработанного воздуха.

Области применения. Области применения теплообменников с промежуточным теплоносителем в промышленности и в системах кондиционирования воздуха сходны с областями применения теплооб-

менников с тепловыми трубами. На рис. 7.8 представлена схема завода в Швеции по изготовлению оболочки для колбасы. Пять идентичных систем было использовано для утилизации сбросной теплоты, которая затем передавалась для нагрева поступающего технологического воздуха. Общая стоимость этой установки составила 70 тыс. долл., а период окупаемости — менее одного года.

Для многих промышленных процессов необходимая температура теплоносителя выше той, при которой технически возможно и экономически выгодно использовать в качестве него воду. В этом случае можно применять другие теплоносители, как, например, Dautherm или Thermax (смесь дифенила и дифенилоксида).

Преимуществом этих систем является возможность передачи теплоты на значительные расстояния внутри одного большого промышленного предприятия. Применение жидкого теплоносителя, поступающего по трубам с малым диаметром, делает эту систему еще более экономически выгодной по сравнению с воздушными системами с точки зрения как экономии металла, так и теплоизоляции.

Эффективность применения теплообменников с промежуточным теплоносителем. В [7.10] приводится экономическое обоснование применения их в системе кондиционирования воздуха в одной из лондонских больниц.

Принято, что пар для целей отопления вырабатывается котлом, работающим на жидком топливе, цена топлива 36,7 ф. ст./м³. Это соответствует 0,46 пенс/(кВт·ч). Энергия для привода насоса и воздушного вентилятора рассматривается как поступление теплоты во время отопительного сезона, а в остальное время года — как потери. При расчете капитальных затрат нормативный коэффициент эффективности принимался равным 0,163 (при 10%-ной норме на капитал в течение 10 лет) для всей установки.

Технические характеристики системы вентиляции приведены ниже:

Количество поступающего воздуха, м³/с	11
Количество отработанного воздуха, м³/с	11
Относительная влажность отработанного воздуха, °С	55
Требуемая температура поступающего воздуха, °С	18
Время работы, ч/год	8760

В результате применения системы Ecotherm снижение затрат на топливо составило 3456 ф. ст. в год. За счет системы утилизации теплоты мощность котла может быть снижена на 183 кВт. Соответствующее сокращение капитальных затрат составит 10 ф. ст. кВт, т. е. 1830 ф. ст.

Капитальные затраты на теплообменники, насос, трубопроводы, фильтр составляют 4180 ф. ст., а увеличение объема здания из расчета 25 ф. ст. на 1 м³ — 1000 ф. ст. Тогда общее увеличение капитальных затрат: 4180 + 1000 — 1830 = 3350 ф. ст.

Эксплуатационные расходы, связанные с увеличением капитальных затрат, составят 464 ф. ст., на энергию — 271 ф. ст. и прочие — 100 ф. ст. С учетом стоимости сэкономленного топлива экономия экс-

платационных расходов будет равна $3456 - (461 + 271 + 100) = 2621$ ф. ст. Таким образом, период окупаемости при применении этой системы составляет 1,28 года. Если провести такие же расчеты для систем с шестью и десятью рядами змеевиков, то периоды окупаемости составят 1,41 и 1,54 года соответственно. Оптимальными в этом случае оказываются восемь рядов змеевиков.

7.3. Теплообменники с промежуточным (газовым) теплоносителем

Такая система показана на рис. 7.9. Она может оказаться не такой эффективной, как система с жидким теплоносителем. Однако стоимость самих газовых теплообменников низка, и в тех случаях,

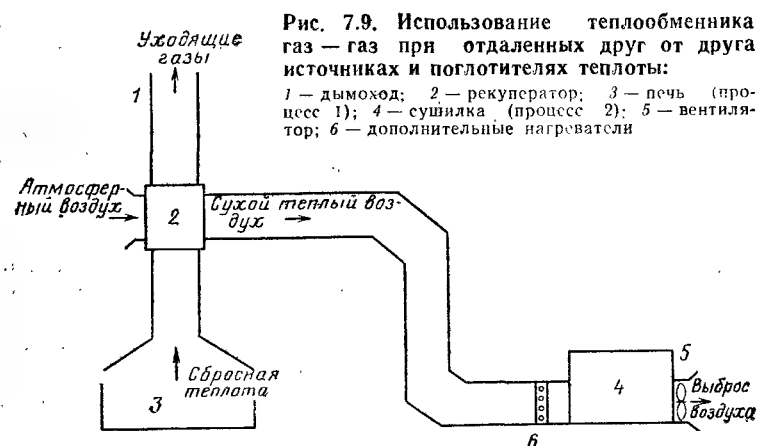


Рис. 7.9. Использование теплообменника газ — газ при отдаленных друг от друга источниках и поглотителях теплоты:

1 — дымоход; 2 — рекуператор; 3 — печь (процесс 1); 4 — сушилка (процесс 2); 5 — вентилятор; 6 — дополнительные нагреватели

когда не требуется воздухо или газопровода большой длины, такая система утилизации теплоты может оказаться экономически более эффективной.

7.4. Вращающиеся регенераторы

Вращающиеся регенераторы применяются в течение более 50 лет для утилизации теплоты продуктов сгорания топлива на больших электростанциях [7, 13] для нагрева воздуха.

Действие вращающегося регенератора показано на рис. 7.10. Так же как теплообменник с тепловыми трубами, регенератор соединяет две прилегающие трубы, по одной из которых движется отработанный газ, а по другой — поток газа, который необходимо нагревать. Газы поступают противотоком. По мере вращения регенератора теплота, абсорбируемая из проходящего через него потока горячего газа и передается потоку холодного. С появлением гигроскопического регенератора появилась возможность передавать влагу точно так же, как теплоту из одного потока в другой.

Вращающиеся регенераторы, так же как и многие другие системы утилизации теплоты, могут применяться в условиях жаркого климата для предварительного охлаждения воздуха, используемого в системах кондиционирования больших зданий. Они также эффективно работают в тех случаях, когда разница температур между потоками горячего и холодного воздуха слишком низкая, чтобы эффективно использовать теплообменник с тепловыми трубами.

Фирма Wing производит вращающиеся регенераторы трех типов. В регенераторах наиболее распространенного типа насадки в виде матрицы изготовлены из плетеной алюминиевой сетки или из нержавеющей стали. Сама насадка обходится дешево и имеет достаточно вы-

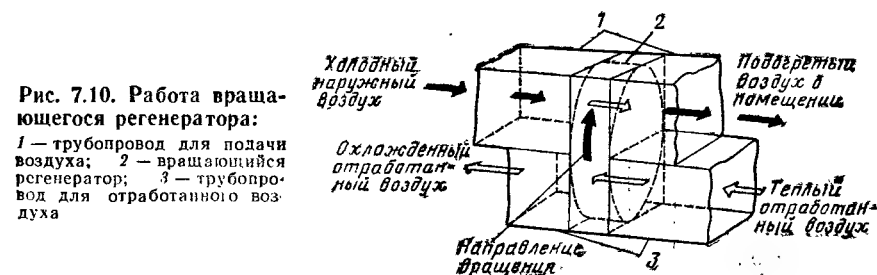


Рис. 7.10. Работа вращающегося регенератора:

1 — трубопровод для подачи воздуха; 2 — вращающийся регенератор; 3 — трубопровод для отработанного воздуха

сокий термический КПД. Однако сопротивление насадок такого типа может быть сравнительно высоким, и их загрязнение происходит быстрее, чем в регенераторах других типов.

Разработка регенераторов, обеспечивающих ламинарный поток, с гофрированной насадкой, напоминающей соты с мелкими ячейками, позволила уменьшить падение давления, загрязнение и облегчить их очистку.

Третьим типом являются вращающиеся регенераторы с неметаллическими насадками, известные под названием гигроскопических. Они обеспечивают передачу влаги, а также теплоты и особенно широко используются в системах отопления и вентиляции. Конструкция такая же, как и для металлического регенератора с ламинарным потоком. Хотя гигроскопический регенератор примерно на 35% дороже металлического, фирма Wing считает, что более высокие капитальные затраты обычно окупаются лучшим переносом теплоты, в том числе скрытой теплоты парообразования. Следует иметь в виду, что содержание скрытой теплоты может быть различным и должно быть точно оценено перед выбором типа регенератора.

Применение насадки из нержавеющей стали позволяет эксплуатировать вращающиеся регенераторы при температуре до 820 °C. В некоторых процессах регенерация должна идти при более высокой температуре. Фирма Corning выпускает регенераторы из пеностекла и керамики, которые имеют большой срок службы при температуре 900 °C, а разработанные для газовых турбин вращающиеся регенераторы с насадкой, изготовленной из нитрида кремния, испытывались при температуре свыше 1000 °C [7, 14].

Эксплуатационные характеристики. При определении эксплуатационных показателей необходимо принимать во внимание ряд факторов:

рабочую температуру. Как было указано выше, тип насадки (металлическая или керамическая) зависит от предела рабочей температуры в каждом конкретном случае;

рабочее давление. В принципе вращающийся регенератор желательно применять в тех случаях, когда поступающий и отработанный потоки газа имеют одинаковое давление. Если в качестве насадки применяется плетеная сетка, то существует возможность значительных протечек через сетку, если давление неодинаковое. В колесах с

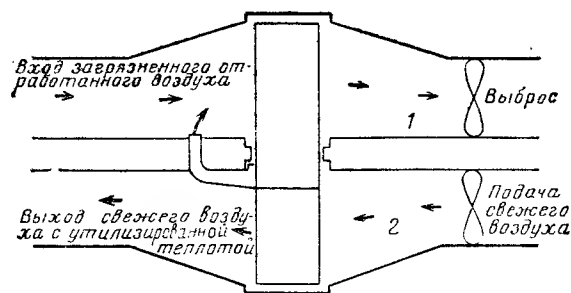


Рис. 7.11. Уменьшение переноса загрязнений во вращающемся регенераторе за счет продувки:

1 — вытяжной вентилятор;
2 — вентилятор приточного воздуха

ламинарным потоком, где газ движется только в осевом направлении, можно выдержать некоторую разность давлений, если предусмотрены надежные уплотнения. Для сведения переноса примесей до минимума предпочтительно поддерживать давление отработанного потока газа более низким, чем давление поступающего потока газа;

перенос загрязнений. Возможность загрязнения чистого поступающего потока газа в регенераторе этого типа привела к тому, что производители предусматривают продувку, как показано на рис. 7.11.

В этом случае часть поступающего воздуха используется для продувки матрицы и выходит через вытяжной канал, а загрязненный или остаточный отработанный газ снова поступает в вытяжной канал. Нормальная работа продувки зависит от правильного расположения вентилятора, так чтобы давление на стороне всасывания было выше, чем на стороне вытяжки, и в тех случаях, когда это требование может быть удовлетворено, перенос загрязнений может составлять всего 0,04 % по объему, а перенос частиц — менее 2% [7.15].

Продувка невозможна без снижения эффективности. Мощность системы вентиляторов должна быть увеличена на 10% номинальной, для того чтобы можно было работать при более высоких скоростях газа, и если в связи с определенными практическими трудностями невозможно добиться правильного расположения вентиляторов, то в каждой радиальной перегородке может быть предусмотрен затвор, хотя это не так эффективно, и перенос примесей может достигать 8% по объему.

В некоторых высокотемпературных металлических регенераторах может быть установлен отдельный вентилятор специально для продувки. Эти вентиляторы имеют мощность до 4 кВт. Расход электроэнергии на привод вентилятора и двигателя для вращения регенератора учитывается при подсчете суммарных эксплуатационных затрат.

В высокотемпературных керамических регенераторах также происходит перенос примесей. В случае применения их для газовых турбин при степени сжатия 4:1 поперечный поток составляет лишь 0,3% потока воздуха в двигателе при максимальной нагрузке.

Неодинаковые скорости потока. Большинство изготовителей регенераторов приводят показатели их работы при одинаковых скоростях поступающего и отработанного потоков воздуха. Если скорости



Рис. 7.12. Компенсация неодинакового расхода газа во вращающемся регенераторе:
1 — система смешения

неодинаковые, то должен быть введен поправочный коэффициент. Обычно размер регенератора и КПД соответственно рассчитываются по максимальной и минимальной скоростям потока.

В тех случаях, когда скорость потока поступающего газа гораздо выше скорости потока отработанного газа (например, в 4 раза), вращающийся регенератор может быть выбран по скорости потока отработанного газа, и он может быть использован для нагрева части поступающего воздуха (например 25%). Устройство, показанное на рис. 7.12, позволяет балансировать поток поступающего в регенератор воздуха, после чего он смешивается с подогретым воздухом.

Падение давления в теплообменнике зависит от скорости газа и конструкции матрицы. Некоторые изготовители предлагают два типа матриц, одна из которых предназначена для максимального переноса теплоты. Из-за большой площади поверхности теплообмена падение давления может оказаться неприемлемым для ряда случаев. Идя на определенное снижение термического КПД, можно применять регенератор с матрицей, имеющей более крупные поры и соответственно низкое сопротивление. Обычно на агрегатах с КПД 81% при скорости воздуха 4 м/с падение давления составляет около 35 Па, в то время как соответствующая система с КПД 76% при той же скорости приводит к падению давления всего на 17 Па (данные фирмы Wing).

Регулирование. Большинство ротационных регенераторов (исключая высокотемпературные керамические регенераторы) приводится в движение с помощью электродвигателей, мощность которых при самом большом диаметре 4 м составляет около 0,5 кВт. Для достижения оптимального переноса теплоты частота вращения обычно составляет

Таблица 7.2. Показатели работы регенератора фирмы Wing модели WCM-1400

G_B , м³/ч	v_B , м/с	Δh , Па	η	G_B , м³/ч	v_B , м/с	Δh , Па	η
4399	1,0	21	0,83	19 796	4,5	91	0,65
6599	1,5	30	0,82	21 996	5,0	102	0,63
8798	2,0	41	0,79	24 196	5,5	112	0,61
10 998	2,5	51	0,76	26 395	6,0	122	0,60
13 198	3,0	61	0,73	28 595	6,5	132	0,58
15 397	3,5	71	0,70	30 794	7,0	142	0,57
17 597	4,0	81	0,68				

Примечание. G_B — количество поступающего воздуха; v_B — скорость воздуха; Δh — падение давления; η — КПД регенератора при средней температуре колеса $t_{ср} = \frac{t_{отр} + t_{пост}}{2} = 150^\circ\text{C}$, где $t_{отр}$ — температура отработанного потока, $t_{пост}$ — температура поступающего потока.

20 с⁻¹. По мере снижения этой частоты снижается термический КПД, и, следовательно, изменение скорости может быть использовано для регулирования тепловой нагрузки. Можно также регулировать количество поступающего воздуха с помощью демпферов и (или) байпасной системы.

Показатели работы типичного вращающегося регенератора приведены в табл. 7.2. Выбранный для этой цели металлический регенератор CORMED фирмы Wing предназначен для работы при температуре в пределах 150—400 °С. Выпускается с различными диаметрами — от 11, до 3,2 м. Максимальное количество воздуха в регенераторах большого размера составляет около 70 тыс. м³/ч, что соответствует скорости 7 м/с. В таблице представлены показатели для модели WCM-1400 среднего размера.

Подобные таблицы представляются изготовителями с поправочными коэффициентами на количество поступающего воздуха и с ука-

Таблица 7.3. Корректировка величины КПД регенератора в зависимости от средней температуры колеса*

Средняя температура колеса, °С	КПД регенератора							
65	0,51	0,56	0,61	0,66	0,72	0,77	0,82	0,88
95	0,52	0,57	0,62	0,67	0,73	0,78	0,83	0,89
120	0,54	0,59	0,64	0,69	0,74	0,79	0,84	0,89
150	0,55**	0,60**	0,65**	0,70**	0,75**	0,80**	0,85**	0,90**
175	0,56	0,61	0,66	0,71	0,76	0,81	0,86	0,91
205	0,58	0,63	0,67	0,72	0,78	0,81	0,86	0,91
230	0,59	0,64	0,68	0,73	0,78	0,82	0,87	0,92

* В столбце известного базисного значения КПД определяется по фактической средней температуре колеса скорректированное значение. (Прим. ред.)

**Базисное значение КПД регенератора при средней температуре колеса 150 °С.

занием влияния температуры на падение давления. Таким образом, методика выбора абсолютно проста, и потребителю нет необходимости производить соответствующие тепловые расчеты. В табл. 7.3 приведены данные по зависимости КПД от средней температуры.

Методика выбора состоит в следующем.

Для того чтобы выбрать регенератор для утилизации теплоты 35 тыс. м³/ч сухого отработанного газа при температуре 260° С при постоянном количестве нагреваемого воздуха с начальной температурой 20° С, необходимо:

определить количество отработанного воздуха при нормальной температуре и давлении:

$$\frac{20 + 273}{260 + 273} 35\,000 = 18\,900 \text{ м}^3/\text{ч};$$

определить среднюю температуру в регенераторе:

$$\frac{260 + 20}{2} = 140^\circ\text{C};$$

выбрать размер и КПД из таблицы. Модель WCM-1400 имеет $\eta = 0,65$ при количестве пост. пающего воздуха 19 796 м³/ч;

откорректировать КПД для средней температуры (табл. 7.3). Необходима незначительная поправка;

определить температуру воздуха после регенератора: $20 + (260 - 20) = 176^\circ\text{C}$;

определить количество утилизируемой теплоты, равное произведению количества газа, теплоемкости газа и температуры воздуха после регенератора:

$$18\,900 \cdot 1,206 \cdot 176 = 4,02 \text{ ГДж/ч.}$$

Области применения и экономическое обоснование. С учетом описанных выше ограничений вращающиеся регенераторы могут применяться для тех же целей, что и теплообменники с тепловыми трубами, однако они могут работать при более высоких температурах.

Фирма Howden, производящая вращающиеся регенераторы для котельных установок электростанций, изготавливает также регенераторы меньшего размера для применения в промышленности [7.16].

Экономия топлива, которая может быть получена при утилизации теплоты сбросных газов котла или технологической установки, графически показана на рис. 7.13.

Исходя из температуры газа, выходящего из котла или процесса, необходимой температуры газа после регенератора (А) определяется процент экономии топлива. Далее по паропроизводительности котла (В), стоимости топлива и с учетом коэффициента избытка воздуха можно получить годовую экономию затрат (С) при 6000 ч работы установки в году.

Одной из областей применения гигроскопического регенератора является печатное производство [7,18]. В этом случае гигроскопический вращающийся регенератор устанавливали на отсос из меловального и гравюрного станков фирмы Harrison Sons Ltd. В этих станках используют большое количество горячего воздуха для испарения растворителей из типографской краски и покрытий. Теплоту часто непосредственно сбрасывают с воздухом в атмосферу после прохождения через

печатный станок, хотя в некоторых случаях практикуется регенерация растворителя.

В этой типографии воздух, поступающий на меловальный и гравюрный станки, нагревают в теплообменнике с оребренными трубками, по которым циркулирует органический теплоноситель (масло). Максимальная производительность нагревателя 12 700 кДж/ч, при этом расход жидкого топлива на нагрев органического теплоносителя составляет 0,39 м³/ч. За счет утилизации 70% теплоты сбросного воз-

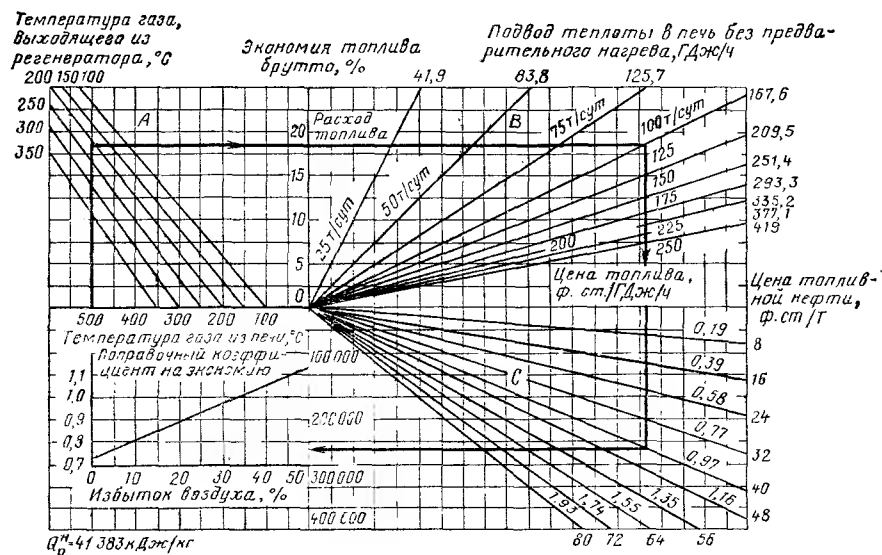


Рис. 7.13. Номограмма определения экономии топлива при использовании вращающегося регенератора

духа затраты на топливо снижены на 600 ф. ст. в неделю. В этой типографии применяются два регенератора, их расположение на одном станке показано на рис. 7.14. Диаметр их 2 м, толщина 280 мм. Насадка представляет собой лист из асбестового волокна, пропитанный хлоридом лития. Благодаря гигроскопическим свойствам улавливается влага, поступающая в канал для подогрева; предусмотрен также сектор продувки.

Общая стоимость установки 42 тыс. ф. ст., из которых 11 тыс. ф. ст. затрачено на регенератор. Большая часть воздухопроводов, стоимость которых включена в общую стоимость, необходима для отвода отработанного воздуха, даже если утилизация теплоты не была бы предусмотрена. Период окупаемости капиталовложений в этом случае меньше двух лет.

Детальную оценку работы вращающегося регенератора найти трудно, но одно такое исследование было проведено в университете Манитобы [7.17]. Рассмотрено применение их в системах кондиционирования воздуха, в частности в больницах. До сих пор еще не опубли-

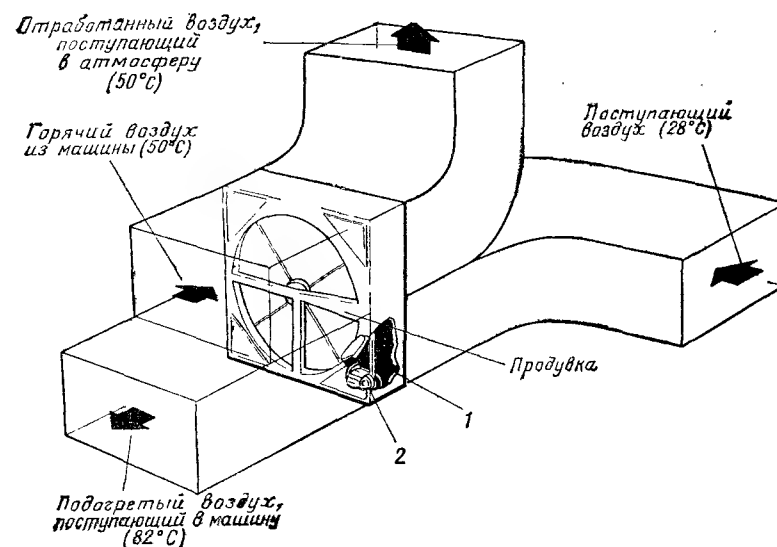


Рис. 7.14. Вращающийся регенератор, применяемый для утилизации теплоты гравировальной установки на печатной фабрике:

1 — ремной привод; 2 — электродвигатель

кованы подробные результаты, но общий итог сводится к тому, что максимальное значение КПД (70—75%) достигается при частоте вращения более 16 с⁻¹. КПД возрастает по мере того как соотношение масс потоков отработанного и поступающего воздуха снижается с 1,0 до 0,5.

7.5. Пластинчатые теплообменники

Пластинчатые теплообменники приобретают все большую популярность в целом ряде отраслей промышленности, в частности в пищевой. Работа теплообменника этого типа показана на рис. 7.15. Потоки жидкости разделены тонкой гофрированной металлической мембраной. В результате турбулизации потока, как показано на рис. 7.16, достигается повышение коэффициента теплопередачи.

Каждая пластина снабжена прокладкой, обеспечивающей полную изоляцию нагреваемой или охлаждаемой жидкости. В теплообменнике имеется целый ряд таких пластин, подвешенных к раме и прижатых к неподвижной жесткой концевой пластине с помощью подвижной пластины, расположенной на другом конце теплообменника.

Основным конкурентом пластинчатого теплообменника является обычный теплообменник кожухотрубчатого типа. Несмотря на то что он значительно усовершенствован за последние годы с целью повышения коэффициента теплопередачи, он имеет ряд недостатков, связанных с относительно большими размерами и плохим распределением потока жидкости. При эксплуатации появляются также проблемы очист-

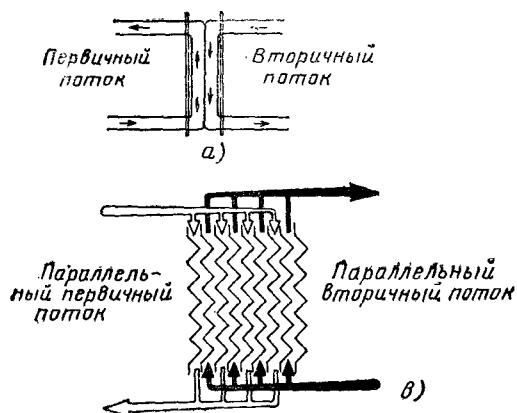


Рис. 7.15. Работа пластинчатого теплообменника:
а — тип 1; б — тип 2; в — тип 3

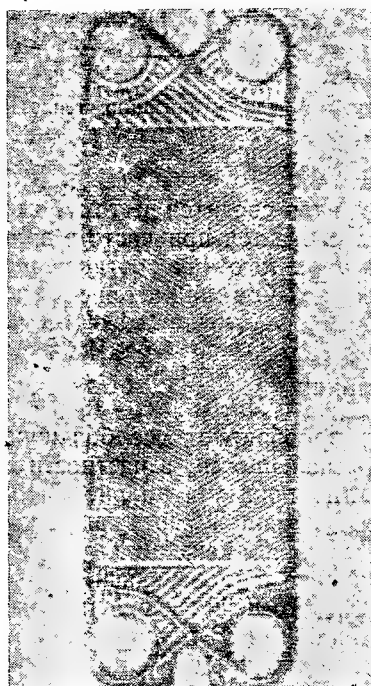


Рис. 7.16. Гофрированная пластина, применяемая для создания турбулентного движения, обеспечивающая высокий коэффициент теплопередачи

ки, а из-за изменения направления потока в этих теплообменниках может иметь место значительное падение давления. Безусловно, теплообменник кожухотрубчатого типа идеален для работы при высоком давлении, однако необходимо отметить, что пластинчатые теплообменники, собранные на опорной раме, могут выдерживать рабочее давление около $20 \cdot 10^5$ Па. Сравнение поверхностей нагрева и падения давления теплообменников этих двух типов дано в табл. 7.4 [7.19]. Эти результаты, основанные на исследованиях, проведенных в США, показывают, что можно значительно уменьшить поверхности нагрева в результате применения пластинчатых теплообменников, и за одним или двумя исключениями в этих теплообменниках падение давления ниже.

Производительность пластинчатого теплообменника может быть повышена или снижена путем изменения количества пластин. Одна сборка может обеспечить пропускную способность максимум $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ жидкости при рабочей температуре около 300°C . Пластины обычно выполнены из нержавеющей стали, но для специальных типов используются такие материалы, как титан, гастрелой, алюминий, тантал и др.

Таблица 7.4. Сравнение поверхности нагрева и падения давления в пластинчатых и кожухотрубчатых теплообменниках

Теплоноситель	Вид	Температура, $^\circ\text{C}$ (вход/выход)	Кожухотрубчатый теплообменник		Пластинчатый теплообменник	
			Поверхность нагрева, м^2	Падение давления, кПа	Поверхность нагрева, м^2	Падение давления, кПа
Углеродород (А)		160/49				
Вода (В)		33/49				
Вода (А)		42/28				
Морская вода (В)		22/37	1130	131	330	74
Бензин (А)		105/35				
Вода (В)		26/35	84	131	26	61
Растворитель (А)		60/40				
Вода (В)		26/35	170	22	41	9,7
Сточные воды (А)		106/38				
Соленая вода (В)		20/41	140	31	36	21
				72		24
				55		31
						69

Примечание. А — греющий; В — нагреваемый теплоноситель.

Хотя для первичного и вторичного потоков применяются идентичные пластины, скорости этих потоков могут быть неодинаковыми.

На рис. 7.17 приведен пример применения пластинчатого теплообменника в промышленной установке выпарки фирмы Albright Wilson Ltd, который был поставлен фирмой APV.

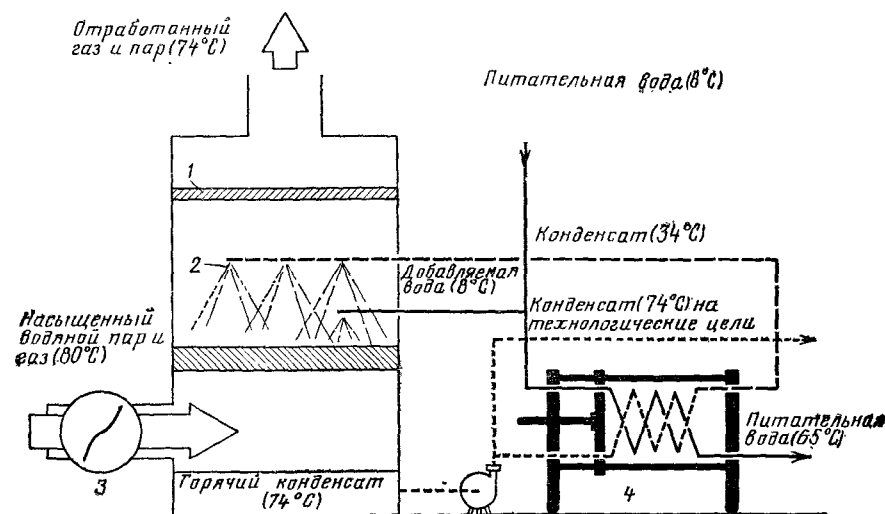


Рис. 7.17. Применение пластинчатого теплообменника фирмы APV в промышленной установке выпарки:

1 — каплеотделитель; 2 — разбрызгиватель; 3 — компрессор; 4 — пластинчатый теплообменник

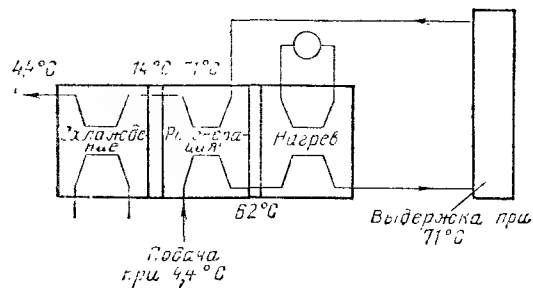


Рис. 7.18. Применение пластинчатого теплообменника на заводе пастеризации молока

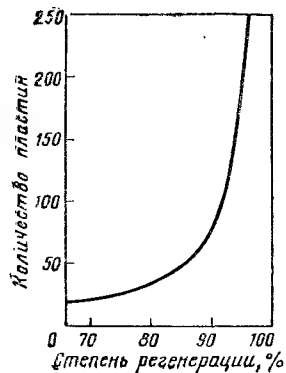


Рис. 7.19. Зависимость между количеством пластин и степенью регенерации

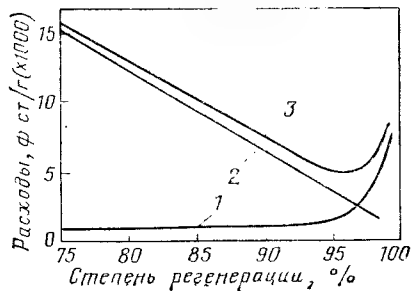


Рис. 7.20. Влияние степени регенерации теплоты на расходы на установке пастеризации молока:
1 — капиталовложения; 2 — эксплуатационные расходы; 3 — суммарные расходы

Пластинчатый теплообменник типа Paraflo, предназначен для подогрева питательной воды котла. Источником теплоты является отработанный насыщенный водяной пар и газ из выпарных аппаратов с температурой 80 °С, который компрессором подается в конденсатор. Конденсат при температуре 74 °С проходит через теплообменник для нагрева питательной воды от 8 до 65 °С и возвращается в конденсатор при температуре 34 °С. Избыток конденсата используется на технологические цели.

Пластины теплообменника, выполненные из нержавеющей стали 106, имеют общую поверхность 55 м², весь теплообменник занимает площадь 3,0×0,75×2,0 м, а его производительность составляет 750 тыс. л горячей воды в сутки.

Стоимость всей установки с трубопроводами, компрессором и охлаждающей колонной составила 9200 ф. ст.

Пластинчатые теплообменники находят широкое применение [7.21] в целом ряде процессов молочной промышленности. На рис. 7.18 приводится процесс пастеризации молока. Так как молоко охлаждает-

ся перед разливом в бутылки, то эта теплота может использоваться для нагрева молока, поступающего в пастеризатор. Таким образом утилизируется теплота, которая обычно сбрасывается с охлаждающей водой. При этом сокращаются почти на 90% затраты энергии на процесс пастеризации. В представленном примере утилизируется 86% сброшенной теплоты.

Из рис. 7.19 видно, что можно утилизировать и более 90% теплоты, сохранив приемлемые размеры теплообменника. Для определения степени регенерации в определенном процессе необходимо принимать во внимание стоимость энергии, капитальные затраты на пластины и эксплуатационные расходы. Повышение стоимости энергии привело к тому, что если в процессе пастеризации до недавнего времени обычно применялись регенераторы с КПД 85%, то в настоящее время идут на увеличение капитальных затрат, связанных с установкой дополнительных пластин, чтобы повысить КПД регенератора до 90% и выше. На рис. 7.20 показано влияние регенерации теплоты на расходы для установки пастеризации молока производительностью 5,7 л в секунду.

Коэффициенты теплопередачи в пластинчатых теплообменниках изменяются в диапазоне 10 000—2500 кДж/(м²·ч·°С), и площадь поверхности пластин обычно составляет 1 м². Потери теплоты незначительны, поскольку только ребро пластины имеет контакт с воздухом, и нет необходимости в теплоизоляции.

При сравнении пластинчатых теплообменников с кожухотрубчатыми необходимо принять во внимание конструкционные материалы. Пластинчатые теплообменники обычно изготавливают из нержавеющей стали или других дорогостоящих материалов, что продиктовано требованиями их применения.

7.6. Экономайзеры

Экономайзер обычно применяется для утилизации теплоты уходящих газов в котлах, хотя в настоящее время он стал применяться и в других процессах, в которых газы могут быть использованы для нагрева воды или получения пара.

На рис. 7.21 и 7.22 показаны две схемы, улучшающие работу экономайзера с целью повышения его надежности при достаточной глубине утилизации теплоты газов [7.22].

Первая схема (рис. 7.21) позволяет исключить парообразование на горячем конце экономайзера и связанные с этим гидравлические удары. Часть питательной воды отводится в испаритель, при этом получают около 5% пара производительности котла и экономится 15% конденсата.

Вторая схема позволяет за счет рециркуляции части питательной воды исключить конденсацию газа на холодном конце экономайзера и связанную с этим коррозию.

На рис. 7.23 [7.25] схематически показано применение экономайзера для нагрева воды газами после регенератора газовой турбины. Впрыск воды в камеру сгорания газовой турбины приводит к значи-

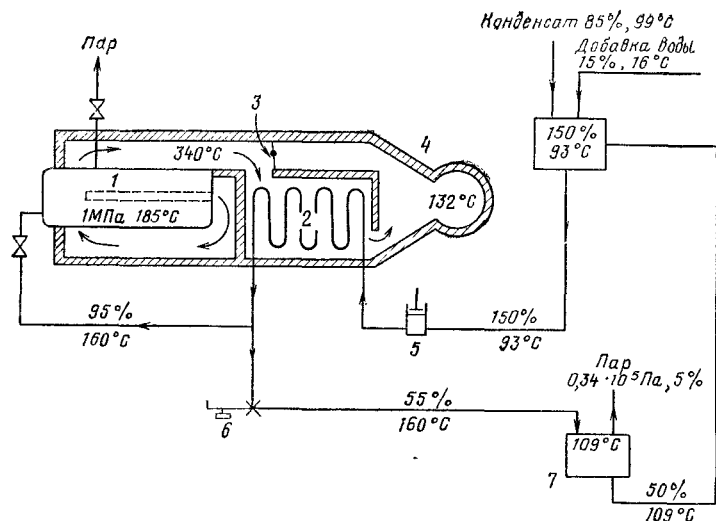


Рис. 7.21. Схема экономайзера с регулированием максимальной температуры питательной воды:

1 — котел; 2 — экономайзер; 3 — байпасная заслонка; 4 — газосход; 5 — питательный насос; 6 — предохранительный клапан; 7 — аппарат мгновенного вскипания

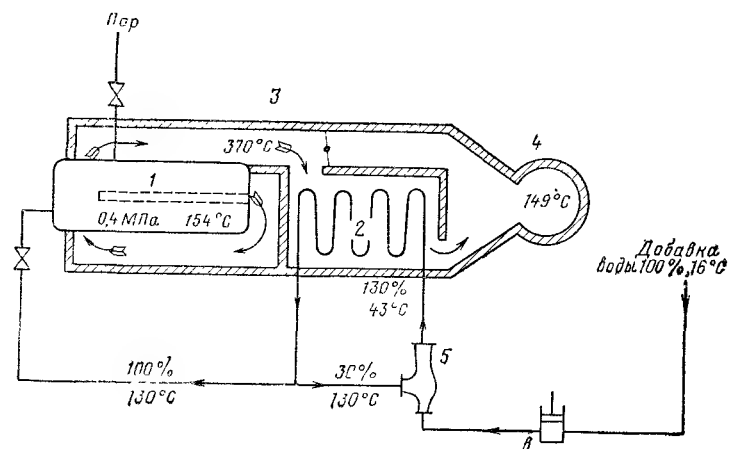
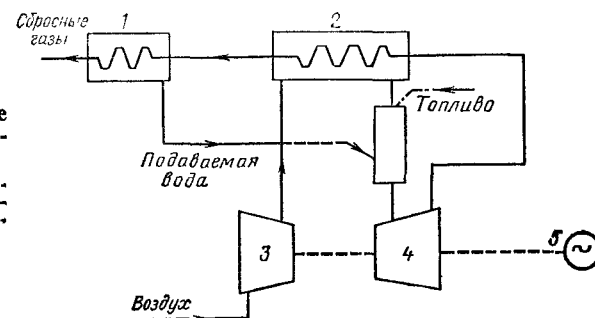


Рис. 7.22. Схема экономайзера, предотвращающая конденсацию газа на трубках экономайзера:

1 — котел; 2 — экономайзер; 3 — байпасная заслонка; 4 — газосход; 5 — циркуляционный насос; 6 — питательный насос

Рис. 7.23. Применение экономайзера для газовой турбины:

1 — экономайзер; 2 — регенератор; 3 — компрессор; 4 — газовая турбина; 5 — генератор



тельному сокращению подачи воздуха и в результате этого к уменьшению чувствительности к изменению давления, а также позволяет регулировать начальную температуру газа перед турбиной.

7.7. Котлы-утилизаторы

Использование физической теплоты газов для получения пара имеет целый ряд преимуществ по сравнению, например, с газовыми теплообменниками:

поскольку процесс кипения связан с высоким коэффициентом теплопередачи, котел-утилизатор является одним из наиболее компактных типов агрегата по утилизации теплоты;

эти установки в большинстве случаев требуют меньших капитальных затрат, чем другие установки утилизации теплоты такого же назначения;

котлы-утилизаторы могут выдерживать высокотемпературные потоки отработанного газа, и не существует проблем выбора материалов и срока их службы, поскольку благодаря высоким коэффициентам теплопередачи в трубках поддерживается сравнительно низкая температура, близкая к температуре насыщения при соответствующем давлении;

маневренность котла-утилизатора высокая, нагрузку можно изменять путем регулирования рабочего давления пара;

не требуется точного регулирования расхода газа и воды.

Однако если на заводе имеются жесткие требования к качеству пара, то необходимо применять соответствующую химическую подготовку питательной воды, что связано с дополнительными капитальными и эксплуатационными затратами. Кроме того, сам котел-утилизатор в ряде случаев не может утилизировать достаточное количество теплоты, чтобы снизить температуру газа до требуемого уровня, и для утилизации может потребоваться дополнительное оборудование.

Ниже рассмотрены различные типы котлов-утилизаторов.

Классификация котлов-утилизаторов. Котлы-утилизаторы могут быть классифицированы следующим образом: газотрубные, водотрубные и модульные.

В газотрубном котле-утилизаторе дымовые газы проходят внутри труб поверхностей нагрева, а вода и пароводяная смесь — снаружи.

Конструктивно давление пара в этих котлах ограничивается примерно 70 МПа, хотя ряд усовершенствований может увеличить рабочее давление почти вдвое [7.26]. При этом падение давления со стороны газа выше, чем в водотрубных котлах. Если температура утилизируемого газа очень высокая, то трубная доска на входе газа часто выходит из строя, и это приводит к сокращению межремонтного срока.

Что касается преимуществ, то газотрубный котел обычно наиболее дешевый из этих систем, и поскольку он менее восприимчив к загрязнению со стороны газа, то его можно применять при сильно загрязненных сбросных газах. Если и произошло сильное загрязнение, то легче чистить трубы изнутри, чем чистить наружные поверхности на близко расположенном пучке труб. В том случае, когда давление газа очень высокое (5 МПа), газотрубный котел имеет и то преимущество, что газ находится внутри труб. Однако КПД его может быть низким, если охлаждаемый газ имеет невысокое значение коэффициента теплоотдачи.

Водотрубный котел-утилизатор отличается от газотрубного котла тем, что вода находится в трубах, а отработанный газ проходит по наружной поверхности труб. Область применения водотрубных котлов значительно шире, в особенности если требуется пар высокого давления. КПД его значительно выше, чем газотрубного котла, поскольку на наружной поверхности нагрева может быть увеличена без особых трудностей. В особенности это важно в тех случаях, когда коэффициент теплоотдачи от газа к стенке труб низкий или скорость газа из-за больших сопротивлений невысокая.

Надежность водотрубных котлов обычно выше, чем газотрубных, но подверженность загрязнению наружных поверхностей труб, а также трудность очистки должны быть приняты во внимание при выборе типа котла.

Применение модульных котлов для утилизации теплоты связано с охлаждаемыми водой двигателями, как, например, дизельными, и поршневыми двигателями, работающими на природном газе. В этом котле теплота уходящих газов и теплота от охлаждающей рубашки двигателя используется для получения пара, при этом охлаждающая рубашка действует, по существу, как подогреватель питательной воды.

Применение. При выборе котла-утилизатора необходимо принимать во внимание потребители, которым будет направляться полученный в котле пар, и технологическое назначение котла. В последнем случае должны рассматриваться следующие возможности [7.27]:

газ непосредственно сбрасывается. В этом случае единственным назначением котла-утилизатора является сведение до минимума тепловых потерь до сброса газа в атмосферу;

газ требует охлаждения для последующего использования. Наряду с выработкой пара в данном случае котел выполняет полезную функцию охлаждения газа. Примерами процессов, в которых котел выполняет эту функцию, являются установки обжига пирита и сжигания серы;

газ требует охлаждения, но стабильность процесса зависит от скорости охлаждения. В данном случае работа котла-утилизатора является неотъемлемой частью технологического процесса. Областью при-

менения котлов для этой цели являются, например, холодильники крекинг-газа, установки по производству этилена.

Основными областями использования пара котлов-утилизаторов являются:

использование непосредственно в технологическом процессе или для целей отопления. В этом случае обычно получают пар сравнительно низкого давления;

использование для выработки электроэнергии или электроэнергии и теплоты комбинированным способом. В этом случае требуется пар высокого давления и обычно перегретый;

применение в качестве отпаривающей среды в технологическом процессе (низкий уровень утилизации).

Котлы-утилизаторы газовых турбин. Уже подчеркивалась необходимость полностью использовать системы утилизации теплоты для того, чтобы повысить экономическую эффективность выработки электроэнергии на заводе, применения двигателей для привода компрессоров и другого подобного оборудования.

КПД газовой турбины составляет всего 25%. Системы утилизации позволяют использовать 75% теплоты уходящих газов турбины и повысить их КПД до 80%. Применение котла-утилизатора за газовой турбиной для получения пара высокого давления позволяет утилизировать 65% сбросной теплоты и получить общий КПД системы около 72%.

Потенциальная теплота утилизированных сбросных газов турбины составляет около 10 кВт/(кг/с) на каждый градус падения температуры. При потоке газов 15,4 кг/с и падении температуры газа в утилизаторе с 654 до 160 °С мощность утилизационной установки составляет около 6,1 МВт. Для сравнения, если эквивалентное количество топлива применяется в обычном котле с $\eta = 80\%$, то тепловая мощность процесса горения несколько выше 7,9 МВт, что соответствует использованию 14 л/мин жидкого топлива или 720 м³/ч природного газа.

Срок окупаемости этого оборудования 3 года с учетом эксплуатационных расходов.

В котле-утилизаторе газовой турбины предусмотрено дополнительное сжигание топлива [7.23]. Обычно котел-утилизатор для газовой турбины выбирается по количеству сбросных газов, а не на основе потребности в паре на заводе и режимов его потребления, что делает эту установку сравнительно дорогой. Поскольку в газах содержится достаточное количество кислорода, они могут быть использованы в процессе сжигания топлива. В некоторых случаях можно увеличить паропроизводительность котла по сравнению с котлами без дополнительного сжигания топлива на 200%. При этом повышение производительности котла достигается за счет установки простых горелок с решеткой. Кроме того, предусматривается байпасная дымовая труба, которая позволяет при необходимости работать с более низкими нагрузками, чем если бы все количество газов сбрасывалось в атмосферу через котел.

Пар, получаемый за счет использования сбросной теплоты поршневых двигателей внутреннего сгорания. Система Vaporphase, изготовленная в США фирмой Pott Industries Inc., является, одним из наиболее

популярных типов агрегата утилизации сбросной теплоты поршневых двигателей. Эта система имеет мощность от 100 кВт до 15 МВт и применяется для больших 16-цилиндровых двигателей.

В системе, изготовленной фирмой Pott Industries Inc. (рис. 7.24 и 7.25), одновременно используется теплота сбросных газов и охлажде-

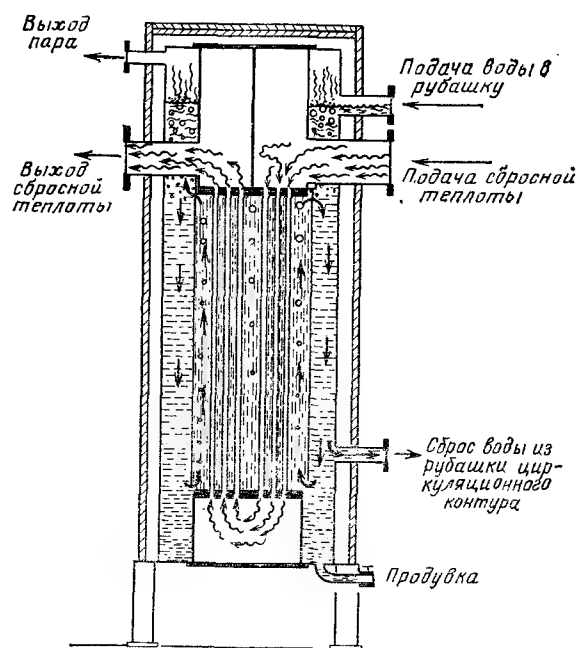


Рис. 7.24. Вертикальная система утилизации сбросной теплоты двигателей внутреннего сгорания

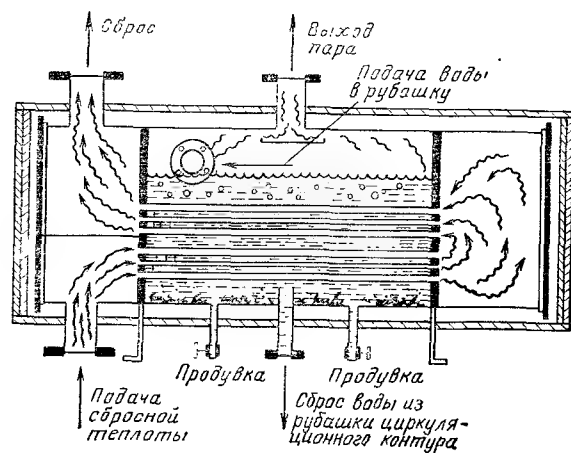


Рис. 7.25. Горизонтальный котел-утилизатор

ния двигателя, $\eta = 75\%$. Так же как и многие другие котлы-утилизаторы для двигателей, этот котел служит глушителем звука.

7.8. Рекуператоры

Рекуператор представляет собой теплообменник типа газ—газ, обычно применяемый для утилизации теплоты сбросных горячих газов. Самое широкое применение рекуператор получил в качестве подогревателя воздуха, поступающего в котлы и печи. В этих случаях он является прямым конкурентом вращающихся регенераторов и в меньшей степени — теплообменников с тепловыми трубами.

Преимущества применения рекуператоров:

- сокращение потребности в топливе;
- уменьшение количества избыточного воздуха;
- возможность достижения более высокой температуры факела;
- уменьшение химического недожога топлива;
- увеличение скорости горения;
- уменьшение окисления технологического продукта;

Существуют два основных типа рекуператоров: конвективные и радиационные.

Конвективные рекуператоры. Эти рекуператоры могут применяться в тех случаях, когда температура газа ниже 1000°C , хотя допустимы и более высокие температуры, если использованы специальные материалы и способы изготовления. Первоначально все рекуператоры изготавливали из керамических материалов, но возникали серьезные проблемы утечек, и в настоящее время они в большинстве случаев заменены металлическими.

Как и во многих других типах теплообменников, в конвективных рекуператорах применяются чугунные и стальные трубы, смонтированные в пучки. Недостатками теплообменников с чугунными трубами являются ограничение давления и недостаточная газоплотность [7.29].

На рис. 7.26 показан 4-ходовой горизонтальный рекуператор, разработанный фирмой Thermal Efficiency Ltd. В этом рекуператоре применяются гладкие и оребренные трубы. Гладкие трубы содержат определенный процент хрома и никеля, расположены перед сборными оребренными трубами для защиты их от локального нагрева. Хром обеспечивает устойчивость к окислению при высокой температуре, а никель улучшает пластичность в зонах с высоким термическим напряжением. Типичные области применения этих рекуператоров — нагревательные колодцы и нагревательные печи, где дополнительным требованием является стойкость к абразивным газам и газам, содержащим спекшуюся пыль. Хотя в данном случае замена труб не так удобна, как в случае рекуператоров, в которых трубы крепятся болтами, каждая труба может быть изъята из пучка, если сварной шов разрушен.

Рекуператоры со сборными трубами применяются исключительно как теплообменники конвективного типа для утилизации теплоты газов с температурой до 950°C . Имеется множество типов рекуператоров с тянутыми стальными трубами. В некоторых типах применяют

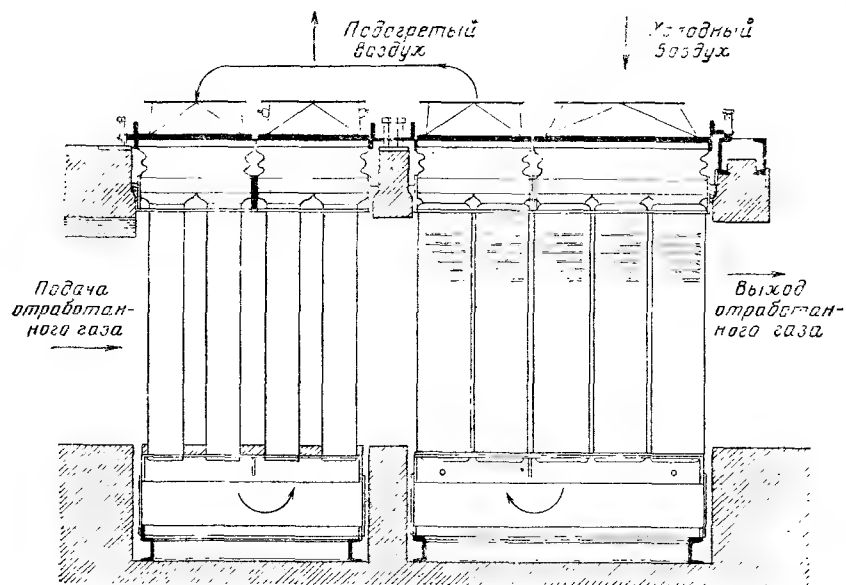


Рис. 7.26. 4-ходовой горизонтальный рекуператор

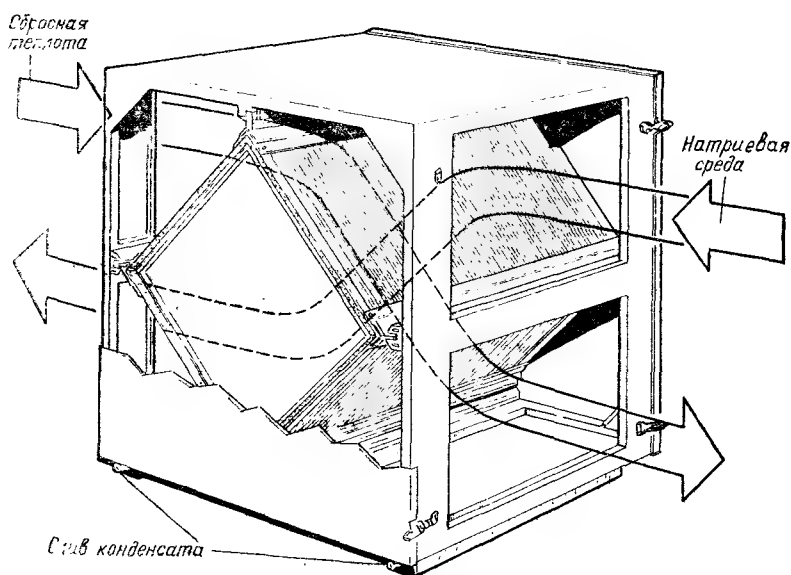


Рис. 7.27. Стационарный рекуператор Econovent EX

U-образные трубы для сведения до минимума напряжения, вызванного тепловым расширением. Эти рекуператоры часто применяются там, где необходимо утилизировать значительную часть теплоты излучения и где трубы обычно неоребранные. Однако количество теплоты,

передаваемой от греющего к нагреваемому теплоносителю, увеличивается потому, что, если толщина стенок литых труб составляет около 8 мм, толщина стенок стальных труб может быть всего 3 мм.

До сих пор рассматривались рекуператоры, в которых отработанный газ омывает наружную поверхность труб, причем за один цикл, а воздух движется внутри. Газотрубные рекуператоры, которые похожи на кожухотрубчатые теплообменники, применяются в случае загрязненных газов, и поскольку трубы легче чистить изнутри, грязный отработанный газ проходит внутри трубы.

Как было упомянуто выше, металлические рекуператоры применяются гораздо шире, чем керамические. Однако в некоторых случаях они применяются при высоком давлении и высокой температуре. В гл. 3 приводится описание этих установок, разработанных фирмой British Steel Corporation. Многие производители могут поставлять керамические трубы для рекуператоров, выдерживающие температуру отработанного газа до 1800 °С. Проблема герметизации рекуператоров этого типа была решена благодаря применению насадки из керамического волокна, основанного на силикате алюминия. Такой рекуператор, например, с трубами марки Carbofrax и Refrax, разработанный фирмой Carborundum Co. и установленный непосредственно на выходе из обжиговой печи, запроектирован на использование теплоты газа при температуре 1800 °С в количестве 0,86 м³/с и на нагрев воздуха до температуры 1200 °С. Тепловая мощность этого рекуператора составляет 104 кВт.

Для менее жестких условий имеются очень простые рекуператоры. Показанный на рис. 7.27 стационарный рекуператор Econovent EX был разработан фирмой Munters в Швеции для утилизации теплоты влажного или насыщенного отработанного воздуха или газов, которые могут содержать большое количество скрытой теплоты. Эта же



Рис. 7.28. Рекуператор фирмы ITT Radnor, применяемый для отопления

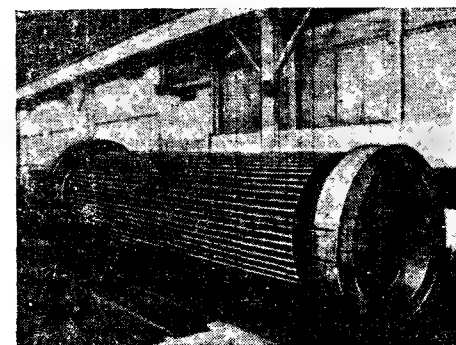


Рис. 7.29. Кожухотрубчатый рекуператор, применяемый для высокотемпературных газовых потоков

фирма производит также вращающиеся рекуператоры, но в сравнении с ними в рекуператоре Eсоpоvent EX устранена проблема переноса загрязнений. С его помощью может быть утилизировано 70—75% явной и скрытой теплоты потока отработанного газа, и эта теплота передается к близлежащим узким каналам, по которым поступает воздух, таким образом, он в некотором отношении похож на пластинчатый теплообменник, применяемый для газов. Рекуператор собирается из отдельных модулей, каждый из которых рассчитан на 0,5—1,5 м³/с газа. Сбор и отвод конденсата также осуществляются внутри рекуператора.

На рис. 7.28 показан сравнительно простой рекуператор, который может быть расположен в вентиляционных воздуховодах и газоходах для нагрева теплоносителя для целей теплоснабжения или использования его в технологическом процессе. В нем применяется нагреватель, работающий на газе, изготовленный фирмой ITT Reznor; конструкция его такова, что не происходит переноса загрязнения. КПД рекуператора ниже, чем некоторых других типов (обычно 35—55%), но он дешевле и проще в эксплуатации.

Радиационный рекуператор имеет форму двух концентрически расположенных цилиндров, при этом воздух, который должен нагреваться, проходит по наружному кольцевому каналу, а отработанные газы идут по центральному каналу. Он монтируется таким образом, что трубы расположены между двумя коллекторами. На рис. 7.29 приводится радиационный рекуператор этого типа.

По сравнению с конвективными рекуператор радиационного типа имеет очень низкое сопротивление потоку газа, и в большинстве слу-

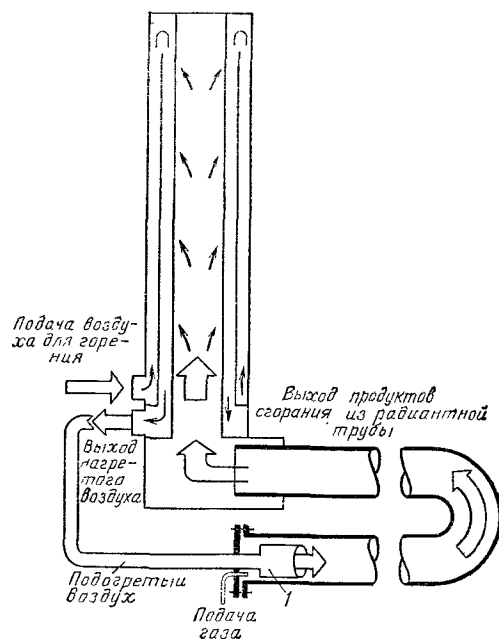


Рис. 7.30. Радиационный рекуператор фирмы Gibbons — Holcroft:
1 — горелка

чаев не требуется его очистка. Через него могут проходить самые грязные отработанные газы, и он может встраиваться непосредственно в газоход или дымовую трубу.

Размеры этого рекуператора могут быть различными, самый большой рекуператор имеет длину около 50 м и диаметр 3 м. Эти рекуператоры выполняются из труб для разделения отработанного газа и воздуха, а не в виде одного кольца. Такие рекуператоры применяются в тех случаях, когда требуется нагреть воздух до температуры выше 600 °С. Предпочтительно, чтобы воздух и газ шли параллельными потоками для снижения гермического напряжения труб. Рекуператоры такого типа применяются, например, в печах для сварки стекла.

Радиационный рекуператор обычно считается наиболее надежным и имеет самый длительный срок службы.

Так же как при утилизации теплоты отработанных газов из котла и печи, радиационный рекуператор может применяться вместе с радиантными трубами, образуя автономный агрегат, как показано на рис. 7.30. Отделением новых процессов фирмы Chrysler Corporation были установлены новые рекуператоры с радиантными трубами на печах и было достигнуто снижение расхода топлива на 26% [7.30]. При этом производственная мощность возросла на 1/3 и было устранено тепловое загрязнение окружающей среды. Капитальные затраты на рекуператоры составили всего 4% общих капиталовложений в 4-зонную печь, а экономия газа по данным фирмы составила 17 м³/ч. Даже при условиях простоя экономия топлива составляет 22%.

7.9. Тепловые насосы

Все описанные ранее в этой главе системы используются для утилизации высокотемпературной теплоты, которая может быть повторно использована непосредственно для теплоснабжения, нагрева сжигаемого воздуха или в другом технологическом процессе. Многие источники сбросной теплоты имеют очень высокую температуру, в частности отработанные газы печей, котлов и т. д. В ряде случаев описанные ранее теплообменники могут успешно использоваться и для утилизации низкопотенциальной теплоты, как, например, в системах кондиционирования воздуха и в процессах сушки, в которых разность температур между теплоносителями относительно низкая.

Очень часто температура среды (жидкой или газообразной) слишком низкая, чтобы ее можно было эффективно утилизировать. В большинстве случаев к этой категории относятся жидкие потоки, а не отработанные газы, хотя тепловой насос может применяться в любом случае. Кожухотрубчатые и пластинчатые теплообменники могут работать при низкой разнице температур (например, с помощью пластинчатого теплообменника можно утилизировать теплоту горячего конденсата с температурой 74 °С для нагрева питательной воды котла от комнатной температуры до 65 °С), и эти теплообменники сравнительно дешевы и надежны в работе при соблюдении эксплуатационных требований.

Однако во многих случаях сбросная теплота с температурой 25—30 °С может быть эффективно утилизирована, если ее улучшить ка-

чественно (т. е. повысить до более высокой температуры), а затем повторно использовать непосредственно в том же процессе для других установок или для целей теплоснабжения, где требуется более высокая температурная теплота.

Идеальный цикл теплового насоса. В энергетическом цикле теплота поступает к рабочему телу, которое затем совершает работу и сбрасывает теплоту при более низкой температуре. В цикле теплового насоса или холодильника все происходит в обратном порядке. Теплота воспринимается при низкой температуре, затем рабочим телом совершается работа, и оно отдает теплоту при повышенной температуре. Тепловые насосы могут обеспечивать и охлаждение, и нагрев и широко применяются для кондиционирования воздуха, что было подробно описано в предыдущей главе. В этой главе рассмотрена работа теплового насоса только для целей нагрева.

Схема теплового насоса показана на рис. 7.31. В испаритель поступает отработанный поток с низкой температурой, и при испарении циркулирующего рабочего тела теплота поступает в систему теплового насоса. Затем образовавшийся пар проходит через компрессор, в котором давление и температура его повышаются. Затем рабочее тело поступает в конденсатор, где отдает теплоту, поглощенную в испарителе, и теплоту сжатия в компрессоре. При этом пар конденсируется, а нагретый конденсат проходит через дроссель, и его температура снижается. Рабочее тело, которое обычно представляет собой фторированные углеводороды, остается в герметично замкнутом контуре.

Идеальный цикл теплового насоса можно представить как обратный цикл идеального теплового двигателя (цикла Карно), что показано на рис. 7.32. Работа теплового насоса обычно характеризуется соотношением теплоты, отдаваемой конденсатором, и работы сжатия компрессора. Другими словами, коэффициент преобразования идеального цикла (ϕ) может быть выражен следующим образом:

$$\phi = T_1 / (T_1 - T_2),$$

где T_1 — температура конденсации, К; T_2 — температура испарения, К.

Типичный температурный интервал рабочих температур теплового насоса 30—80°С. Тогда идеальный ϕ составляет 353/(80—30), или 7,06. Однако на практике тепловой насос имеет гораздо более низкий ϕ , чем предполагаемый в обратном цикле Карно, и он более точно представлен циклом Ренкина, показанным

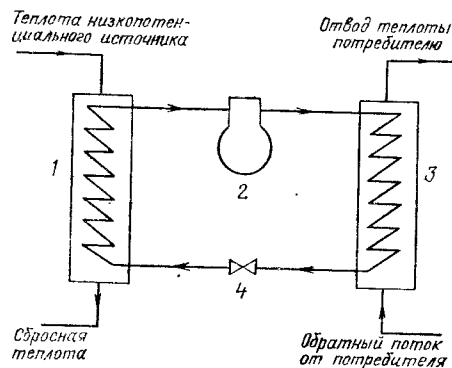
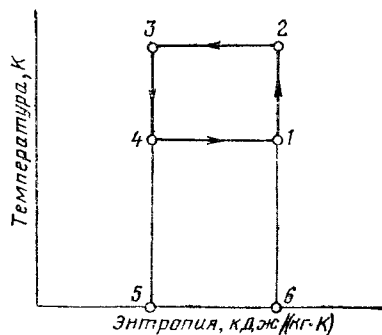


Рис. 7.31. Принципиальная схема теплового насоса:

1 — испаритель; 2 — компрессор; 3 — конденсатор; 4 — дроссель

Рис. 7.32. Идеальный цикл теплового насоса (цикл Карно):

1—2 — изотропическое сжатие; 2—3 — изотермическая конденсация; 3—4 — изотропическое расширение; 4—1 — изотермическое испарение



на рис. 7.33. В реальных установках при расширении рабочего тела имеют место потери за счет механического трения и используется дроссель, поэтому процесс 3—4 происходит при постоянной энтальпии. Поскольку в процессе расширения никакая работа не производится, он не влияет на количество теплоты, поглощаемой в конденсаторе, но уменьшает количество теплоты, воспринимаемой в испарителе при постоянной температуре. Дроссель делает процесс необратимым.

После расширения рабочее тело находится в состоянии насыщенной жидкости, которая в идеальном случае приобретает теплоту в испарителе и вскипает до состояния насыщенного пара.

Кроме того, реальный цикл отличается от обратного цикла Карно еще и тем, что сжатие обычно происходит в области перегретого пара со снятием перегрева в конденсаторе и имеет место дополнительное охлаждение (переохлаждение) рабочего тела между конденсатором и дросселем. В реальном цикле давление рабочего тела падает по мере прохождения его через теплообменники, и это показано на диаграмме 7.34 [7.31].

Источники теплоты теплового насоса. Тепловой насос может успешно работать, только если имеется соответствующий источник теплоты для испарения циркулирующего в системе рабочего тела. За несколькими исключениями, которые будут рассмотрены ниже, тепловой насос до настоящего времени применялся в тех случаях, когда требуется как нагрев, так и охлаждение, например круглогодичное кондиционирование и отопление с использованием отработанной теплоты холодильных установок.

В США в настоящее время применение тепловых насосов для этих целей является обычной практикой. В табл. 7.5 перечислены некоторые изготовители тепловых насосов и показатели их работы.

При кондиционировании воздуха наиболее распространенным источником теплоты является окружающий воздух, который продувается через обретенный испаритель вентилятором. Основным недостатком этого источника теплоты является изменение температуры. В тех случаях, когда требуется наибольшая тепловая мощность, атмосфер-

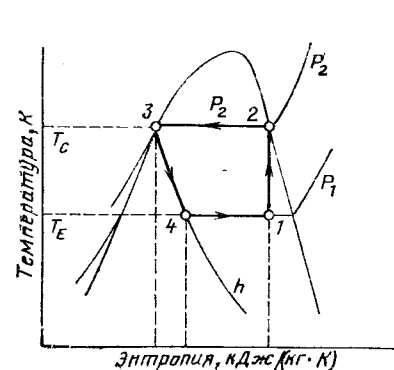


Рис. 7.33. Цикл Ренкина для влажного пара:

1—2 — изотропическое сжатие; 2—3 — изотермическая конденсация при постоянном давлении; 3—4 — адиабатическое расширение; 4—1 — изотермическое испарение при постоянном давлении

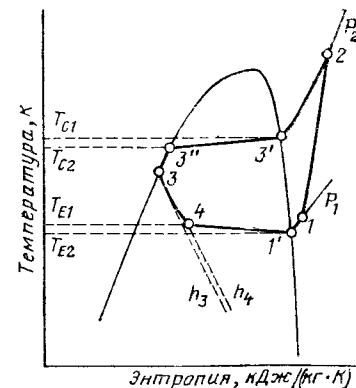


Рис. 7.34. Реальный цикл:

1—2 — сжатие; 2—3' — сжатие перегрева; 3'—3'' — конденсация; 3''—3 — охлаждение жидкости; 3—4 — расширение; 4—1' — испарение; 1'—1 — перегрев

ный воздух имеет низкую температуру и это часто приводит к необходимости применять дополнительную систему обратного нагрева. Для устранения этого был испытан целый ряд природных источников теплоты, которые не подвержены значительным сезонным или даже суточным колебаниям. В 50-х годах змеевик испарителя часто зарывали на глубину более 1 м, но большие поверхности нагрева, необходимые для покрытия тепловой нагрузки из-за низких коэффициентов теплопередачи от почвы к рабочему телу, явились одной из причин отказа от этой системы. В настоящее время в США все больший интерес проявляется к использованию солнечной энергии в качестве источника теплоты для тепловых насосов, но так как солнечная энергия имеется в такое время, когда меньше всего требуется отопление, то в этом цикле предусматриваются обычно системы аккумулирования теплоты.

Некоторые тепловые насосы, как видно из табл. 7.5, сконструированы для работы с водой в качестве источника или поглотителя теплоты. Если тепловые насосы применяются для теплоснабжения, то предпочтительна вода, так как она меньше подвержена значительным колебаниям температуры. В Великобритании в некоторых случаях в качестве источника теплоты применялась речная вода [7.33]. В промышленности источником теплоты для теплового насоса обычно также является вода. Она имеет несколько более высокую температуру, чем природные источники, и менее подвержена сезонным изменениям. Кроме того, параметры и режим работы теплового насоса относительно постоянные.

Таблица 7.5. Тепловые насосы, применяемые в США в системах кондиционирования воздуха

Изготовитель	Тепловая мощность, Вт	Электрическая мощность, Вт	Φ при нагреве
Lennax Industries*	7000/7000	3800/3200	2,18
	26 400/27 200	11 400/9700	2,80
American Air Filter**	2780/2780	1100/1150	2,41
	14 600/15 000	6800/5500	2,72
Carlyte (Carrier) Air Conditioning*	5850/6450	3300/2800	2,30
	34 300/34 300	14 700/12 100	2,84
General Electric*	5300/5300	2800/2500	2,12
	35 000/35 000	15 000/12 600	2,78
Fedders Corp*	6450/6450	4000/3800	1,70
	16 400/17 500	8800/17 500	2,43
York Division of Borg-Warner***	5600 **/6450	2000/2000	3,07
	14 600/15 800	7900/6600	2,40
Westinghouse Electric Corp*	5300/5000	2900/2400	2,08
	17 300/17 300	8900/6900	2,50
Low Impact Technology	—/7000	—	3,00
	—/38 000	—	3,00
Temperature Ltd	1460/2280	850/900	2,53
	3800/5430	1860/1950	2,78

Примечания: 1. Цифры приблизительные.
2. В числителе — данные при охлаждении, в знаменателе — при нагревании.

* Для охлаждения или нагрева воздуха
** Для охлаждения или нагрева воды
*** Для охлаждения или нагрева воздуха и воды.

Они будут определяться требованиями технологического процесса — потребителя высокотемпературной теплоты (это не относится к тепловому насосу, применяемому для отопления промышленных зданий). Необходимо подчеркнуть, что в этой главе будут рассмотрены главным образом вопросы использования сбросной теплоты технологических процессов кроме процесса выработки электроэнергии.

Выбор рабочего тела для теплового насоса. Рабочее тело, применяемое в тепловых насосах, обычно называется хладагентом. Во многих случаях оно идентично тому, которое применяется в обычном холодильнике, а в более высокотемпературных тепловых насосах применяются производные этих жидкостей, обозначаемые буквой R, например R12, R21 и т. д.

Таблица 7.6. Теоретические характеристики хладагентов при использовании их в тепловых насосах

Параметры	Хладагент						
	11	21	113	114	12	31/114	12/31
Давление испарения, кПа	220	385	103	425	1190	758	1200
Давление конденсации, кПа	1000	1610	560	1700	3950	2920	4140
Критическая температура, °C	198	178	214	146	112	142	118
Отношение давлений	4,45	4,2	5,3	3,95	3,35	3,86	3,4
Удельный объем при 50 °C, м³/кг	0,0801	0,0619	0,1298	0,0320	0,0146	0,0324	0,0170
Массовый расход, кг/с	0,098	0,126	0,060	0,245	0,530	0,242	0,450
Чистый холодильный эффект, кДж/кг	114,5	145,5	86,4	48,5	36,6	118,8	65,0
Теплота сжатия, кДж/кг	27,9	35,0	25,6	18,6	18,6	35,0	25,6
Тепловая мощность, кВт	13,9	22,8	6,76	13,0	28,3	37,6	41,7
Φ	5,1	5,2	4,35	3,5	2,9	4,48	3,55

Примечания: 1. Чистый холодильный эффект получают путем вычитания энтальпии хладагента при температуре конденсации из энтальпии перегретого пара, поступающего в компрессор при температуре испарения. Теплота сжатия — это разница энтальпии паров на выходе из компрессора и на входе в него.
2. Температура испарения 50 °C, температура конденсации 110 °C, подача компрессора 28,32 м³/ч.

Давление не является единственным критерием, который используется для выбора рабочего тела для данного конкретного применения. Количество теплоты, которая может передаваться с помощью хладагента, в сильной степени зависит от скрытой теплоты его или энтальпии, значения которой представлены в табл. 7.6. Удельный объем рабочего тела определяет размеры компрессора, необходимого для пропускания заданного расхода хладагента, а температуру определяют предельные условия, выше которых рабочее тело не может быть эффективно использовано. Растворимость хладагента в смазочном масле компрессора является также важным фактором при выборе рабочего тела.

Кроме указанных выше свойств необходимо принимать во внимание и стоимость, хотя ассортимент хладагентов достаточно велик и цены на них относительно низкие. Кроме того, хотя вторичный контур теоретически представляет замкнутую систему, следует помнить, что потери хладагента должны быть минимальными и подпитка даже больших систем не должна составлять значительной доли капитальных и текущих расходов.

Важным фактором является условие безопасности. Хладагент должен быть нетоксичным и должен быть совместим с компонентами контура, с которыми он может вступать в контакт. Он должен быть также негорючим. В настоящее время одним из факторов, который ограничивает применение тепловых насосов при температуре выше 110—120 °С, является термическая стабильность хладагентов.

Кроме обычных хладагентов, перечисленных в таблицах, были разработаны и запатентованы их азэнтропные смеси 31/114 и 12/21. Они характеризуются высоким коэффициентом преобразования (на 60% выше, чем у хладагента R21), критическая температура обеих смесей выше 110 °С.

Компрессоры тепловых насосов. Компрессор представляет собой наиболее важный агрегат в тепловом насосе. Наиболее широко применяются следующие типы компрессоров: поршневые, винтовые и центробежные.

В настоящее время поршневой компрессор чаще всего применяется в тепловых насосах. Он может работать при высоком давлении и сохранять высокий КПД при переменных режимах работы. Существуют три различных конструкции поршневого компрессора. Герметичные и полугерметичные компрессоры приводятся в движение электродвигателем, заключенным в кожухе компрессора. Компрессор этого типа был первоначально разработан для целей охлаждения, он сравнительно дешевый в изготовлении, так как нет необходимости в уплотнениях. Применение герметичных агрегатов несколько ограничено в случае высоких температур, характерных для промышленных процессов. Кроме того, приводным двигателем для них может служить только электродвигатель. Проблема может быть устранена благодаря применению открытого поршневого компрессора, который приводится в действие двигателем любого типа (помимо прямого соединения можно применять ременную передачу).

В тепловом насосе фирмы Westinghouse Templifier, который будет описан ниже, применяется центробежный компрессор, приводимый герметичным электродвигателем. Мощность таких компрессоров — до 300 кВт. Этот компрессор основан на центробежном компрессоре модели SE, который представляет собой одноступенчатый агрегат со встроенной гидравлической системой регулирования. В принципе центробежные компрессоры более дорогостоящие, чем поршневые, особенно при малых мощностях. Однако мощность их более высокая, чем большинства поршневых компрессоров промышленных типов, и они обладают более низким уровнем вибрации.

Винтовые компрессоры широко применяются в больших промышленных тепловых насосах (компрессор MS10 фирмы Grasso Monoscrew с

максимальной температурой на выходе 90 °С имеет теплопроизводительность 6,3 ГДж/ч. Одноступенчатый компрессор, работающий в пределах температур от — 10 до 25 °С, имеет теплопроизводительность 6 ГДж/ч при мощности привода компрессора 361 кВт).

Промышленное применение тепловых насосов. Имеется целый ряд возможных вариантов применения тепловых насосов для утилизации теплоты в промышленности. Описывается пять различных систем, три из которых используют электродвигатели, одна — двигатель внутреннего сгорания и последняя в настоящий момент использует газовую турбину. Выбор наилучшей системы зависит, главным образом, от областей их применения.

Электрические тепловые насосы подразделяются на системы жидкость — жидкость, воздух — воздух. Они могут использоваться в комбинированных системах охлаждения и нагрева.

Утилизация теплоты жидкостей (тепловой насос с электроприводом). Использование тепловых насосов с электроприводом компрессора для утилизации теплоты сточных вод или других жидкостей можно рассмотреть на примере теплового насоса фирмы Westinghouse Templifier. Это одноступенчатые или двухступенчатые тепловые насосы, в которых применяются центробежные компрессоры с теплопроизводительностью 5,44 ГДж/ч и температурой теплоносителя на выходе до 110 °С.

На рис. 7.35 показан тепловой насос Templifier, применяемый для случая, когда теплота утилизируется из сточных вод, имеющих температуру 32 °С, а температура нагреваемой воды должна быть 82,2 °С. В этом случае применяется двухступенчатое сжатие и испаритель мгновенного действия, из которого часть паров поступает на вход второй ступени компрессора [7.36], что приводит к повышению КПД процесса. Коэффициент преобразования этого теплового насоса зависит от условий в испарителе и конденсаторе, и в том случае, когда разница температур источника теплоты и поглотителя теплоты большая, обычно рекомендуется система двухступенчатого сжатия. Кривые, представленные на рис. 7.36, показывают изменение ϕ теплового насоса фирмы Templifier в зависимости от температуры подаваемой низкопотенци-

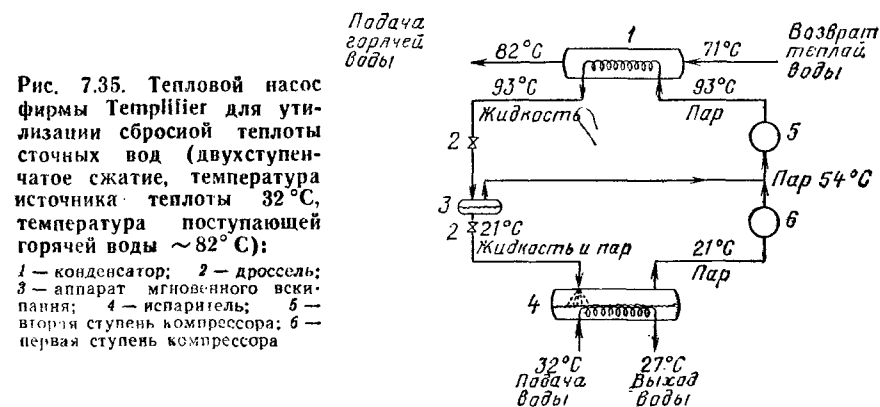


Рис. 7.35. Тепловой насос фирмы Templifier для утилизации сбросной теплоты сточных вод (двухступенчатое сжатие, температура источника теплоты 32 °С, температура поступающей горячей воды ~ 82 °С): 1 — конденсатор; 2 — дроссель; 3 — аппарат мгновенного вскипания; 4 — испаритель; 5 — вторая ступень компрессора; 6 — первая ступень компрессора

альной воды. Эксплуатационные расходы теплового насоса можно сравнить с расходами при использовании прямого электрического нагрева и нагревателя, работающего на жидком топливе при следующих условиях:

Средняя стоимость жидкого топлива, пенс/л	5,2
Стоимость электроэнергии, пенс/(кВт·ч)	1,5
КПД нагревателя, %	70
Энтальпия жидкого топлива, МДж/л	31,6
Коэффициент преобразования теплового насоса ϕ	3,7
Общая потребность в теплоте, кВт·ч	500

Тогда расходы при использовании прямого электрического нагрева составят $500 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} = 7,50$ ф. ст., при применении нагревателя на жидком топливе $5,2 \cdot 10^{-2} \frac{500 \cdot 0,86 \cdot 4,186}{31,6} = 2,96$ ф. ст., а с использованием теплового насоса $\frac{500 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2}}{3,7} = 2,03$ ф. ст.

Таким образом, тепловой насос более экономичен, чем нагреватель на жидком топливе. Сравнение с прямым электрическим нагревом показывает, что расходы снижаются прямо пропорционально ϕ , но вряд ли в промышленности во многих случаях прямой электронагрев можно заменить тепловым насосом.

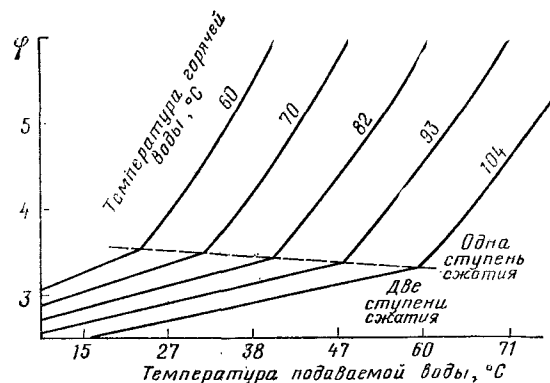


Рис. 7.36. Зависимость ϕ теплового насоса системы Templifier от температуры подаваемой воды

Показатели работы теплового насоса фирмы Templifier могут быть дополнительно проиллюстрированы отношением теплопроизводительности теплового насоса к мощности двигателя компрессора. Эти показатели приведены в табл. 7.7 для одноступенчатого агрегата, нагревающего воду с 54 до 65,5 °C и использующего воду с температурой 35 °C (в этих случаях вода будет охлаждаться до температуры 29,4 °C). Показаны четыре модели фирмы Templifier с двигателями от 63 до 291 кВт. Мощность, необходимая для преодоления потерь падения давления в испарителе и конденсаторе, в этих расчетах не учтена.

Утилизация теплоты воздуха (тепловой насос с электроприводом). Одной из областей успешного применения теплового насоса является процесс сушки строительного леса [7.38], хотя этот метод также применим и для других процессов сушки [7.31].

КПД сушилки может быть повышен благодаря применению для утилизации теплоты теплообменников с промежуточным теплоносителем и с тепловыми трубами. При их применении осуществляется нагрев поступающего в сушилку воздуха за счет утилизации теплоты отработанных газов, которые затем выбрасываются в атмосферу. Теоретически КПД сушилки, в которой циркулирует воздух, может достигать 100%, но практически это невозможно из-за увеличения влажности циркулирующего воздуха. На практике полной рециркуляции мож-

Т а б л и ц а 7.7. Показатели работы теплового насоса Templifier

Модель	Расход воды, м³/ч, при температуре на входе		Теплопроизводительность, ГДж/ч	Мощность привода, кВт	Ориентировочная масса, кг
	35 °C	65,5 °C			
TR050	33	21	0,95	63	2300
TR063	71	44	2,03	132	5300
TR079	106	66	3,05	189	6700
TR100	169	105	4,89	291	10 100

но достигнуть лишь в том случае, если в сушилке предусмотрено удаление влаги из отработанного воздуха, которое может осуществляться с применением теплового насоса (рис. 7.37). Схема потоков в теплонасосной сушилке схематически показана на рис. 7.38. Влажный воздух проходит через испаритель, в котором он охлаждается до температуры ниже точки росы, отдавая явную и скрытую теплоту. В результате охлаждения происходит конденсация части воды в воздухе, и эта вода отводится. Количество конденсата определяет КПД сушилки. Отводимая из воздуха в испа-

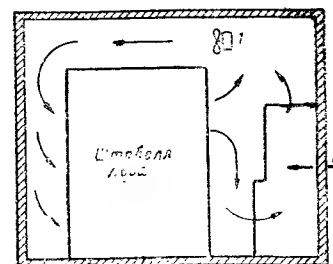


Рис. 7.37. Сушилка с тепловым насосом:

1 — вентилятор; 2 — осушитель (тепловой насос)

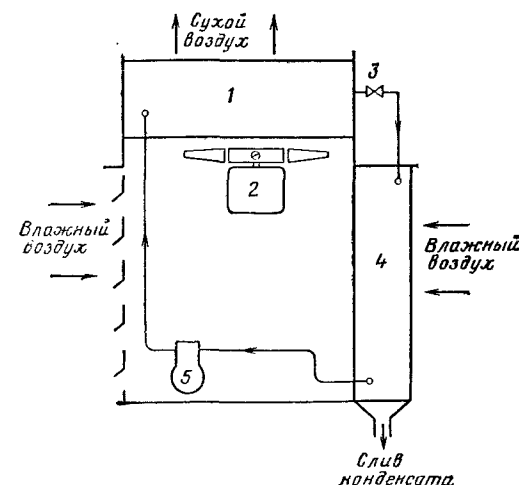


Рис. 7.38. Схема потоков в теплонасосной сушилке:

1 — конденсатор; 2 — вентилятор; 3 — дроссель; 4 — испаритель; 5 — компрессор

рителе явная и скрытая теплота, а также теплота, эквивалентная работе сжатия компрессора, отдается в конденсаторе сухому воздуху. Затем этот воздух проходит через осушаемый материал, дополнительно удаляя влагу. В экспериментальных сушилках достигали $\phi = 3,6$ и экономии около 50% топлива.

Эта система применяется также для сушки сжатого воздуха, исследуется возможность применения ее в печах для сушки кирпича.

Комбинированная система охлаждения и нагрева с применением теплового насоса с электроприводом. Имеется возможность использования обоих потоков теплоты одновременно — как отводимого от конденсатора, так и поступающего в испаритель. Это, очевидно, наиболее экономичный путь, и он может часто применяться с получением хорошего эффекта на тех установках, где требуется охлаждение или есть другой потребитель с меньшей потребностью в охлажденной воде.

Типичным примером является установка по формированию пластмассы под давлением, где требуется холодная вода для охлаждения отливок и отверждения пластмассы. Кроме того, на этом же заводе требуется теплота для поддержания комфортных условий. Тепловой насос, который может выполнять обе эти функции, был установлен на заводе в г. Телфорд в Великобритании. Применялся компрессор фирмы Prestcold. Тепловой насос заменял обычную градирню и снижал температуру охлаждающей воды до $7,2^\circ\text{C}$ в количестве до 1140 л/мин [7.39]. Утилизированная из воды теплота использовалась для отопления помещений. Благодаря регулированию условий работы теплового насоса можно поддерживать высокую производительность формовочных машин независимо от окружающих условий, влияющих на работу градирни. Применение этой системы, показанной на рис. 7.39, позволяет получить экономию в 15 тыс. ф. ст/год с периодом окупаемости около трех лет.

Тепловые насосы с поршневыми двигателями внутреннего сгорания. Приведенные выше примеры тепловых насосов с электродвигателями показывают, что эта система может дать максимальную экономию, если она используется для замены прямого электрического нагрева.

В Великобритании разница в ценах на электроэнергию и другие источники энергии, в частности природный газ, препятствует применению тепловых насосов только для нагрева. Во многих случаях применение теплового насоса с электроприводом для утилизации теплоты теплых сточных вод может оказаться более дорогостоящим как по капитальным, так и по эксплуатационным затратам в сравнении с котельной, работающей на природном газе.

Можно выделить три области применения тепловых насосов в промышленности, из которых только одна является очевидным претендентом для применения электрических тепловых насосов:

утилизация теплоты технологических стоков, когда газ или жидкое топливо используется для предварительного нагрева. В этом случае электропривод теплового насоса может оказаться слишком дорогим;

утилизация теплоты хладагента, применяемого для отвода теплоты от экструдеров, линейных машин и т. д. В этом случае можно ис-

Таблица 7.8. Типичный тепловой баланс 4-тактного газового двигателя, %

Составляющие баланса	Нагрузка, %		
	40	70	100
Полезная мощность	24,45	25,45	25,94
Потери:			
с охлаждением рубашки	19,86	26,96	30,18
со сбросными газами	33,27	32,89	32,28
	(13,07)	(17,50)	(16,14)
с охлаждающим маслом	4,24	3,32	3,03
с излучением и др.	18,18	11,38	8,57
Итого	100,00	100,00	100,00

Примечание. В скобках — утилизируемая часть потерь теплоты со сбросными газами.

пользовать электроэнергию, но другие способы привода дешевле, если здесь одновременно не требуется и холодильный эффект;

утилизация теплоты в системе, в которой нагрев или охлаждение осуществляют с помощью электроэнергии. Тепловой насос с электроприводом, имеющий $\phi = 3$, может привести к сокращению эксплуатационных расходов более чем на 60%, и применение его полностью оправдано.

Другими приводами для компрессоров могут быть дизельный двигатель, паровая машина и газовый двигатель.

Из приведенных трех типов двигателей паровая машина почти полностью снята с производства. Однако дизельные и газовые двигатели выпускаются в промышленных масштабах, и дизельные двигатели сравнительно дешевле благодаря массовому производству для автомобилей и других целей.

Дизельные и газовые двигатели имеют КПД лишь 30%, но благодаря использованию теплоты системы охлаждения воды и отработанных газов (на больших заводах — в том числе и из маслоохладителей) можно достигнуть общего КПД около 80%. Если добавить к этому ϕ теплового насоса, работающего от такого двигателя, то экономическая эффективность может быть высокой.

Применение этих двигателей, конечно, не новость, в течение десятилетий они применяются для привода генераторов на промышленных предприятиях. Мощность генераторов, приводимых газовыми двигателями (поршневыми или газотурбинными), 50—20 тыс. кВт. В частности, в США имеются очень большие поршневые двигатели внутреннего сгорания, работающие на газе.

В настоящее время гораздо больший интерес проявляется к применению этих двигателей для привода воздушных и холодильных компрессоров, используемых, в частности, в тех случаях, когда имеется потребитель сбросной теплоты. Тепловой баланс для 4-тактного газового двигателя без наддува приведен в табл. 7.8 [7.40].

Кроме обычной системы охлаждения с водяной рубашкой на двигателях этого типа может применяться испарительное охлаждение.

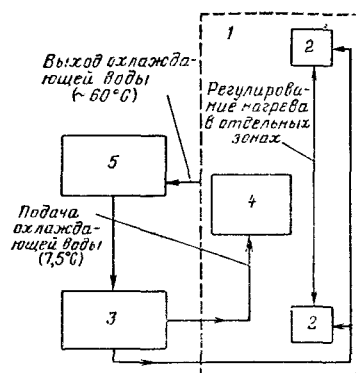


Рис. 7.39. Применение теплового насоса для охлаждения воды и отопления помещений:

1 — пол завода; 2 — вентилятор отопительного прибора; 3 — вход в литейную машину; 4 — холодильная установка, действующая как тепловой насос; 5 — подземный бак

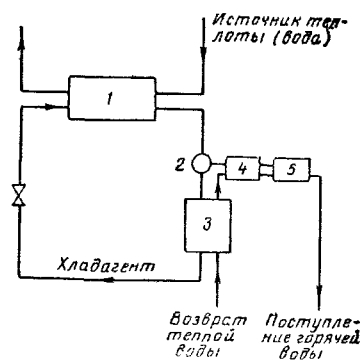


Рис. 7.40. Схема теплового насоса, приводимого в действие поршневым двигателем, работающим на природном газе:

1 — испаритель; 2 — компрессор газового двигателя; 3 — конденсатор; 4 — водяная рубашка; 5 — теплообменник

При этом максимальная температура находится в интервале $100\text{—}125^\circ\text{C}$. По мере прохождения хладагента через рубашку двигателя и по стояку, ведущему к сепаратору, происходит дополнительное испарение, что обеспечивает циркуляцию хладагента за счет естественной конвекции при изменении его плотности. Пар отделяется от воды при атмосферном давлении и направляется в технологический процесс. Воду из сепаратора возвращают в двигатель вместе с конденсатом из технологического процесса.

Предлагалось [7.40] сбросную теплоту двигателя внутреннего сгорания утилизировать непосредственно для повышения температуры нагреваемой жидкости после конденсатора. Это дает возможность получить на выходе более высокую температуру, чем температура, которая может быть достигнута при применении теплового насоса с электроприводом. Как видно из табл. 7, 8, двигатель внутреннего сгорания менее эффективен при частичной нагрузке, но в промышленности, где изменения нагрузки в основном невелики, это не должно быть препятствием для его применения.

На рис. 7.40 показан водо-водяной тепловой насос для утилизации сбросной теплоты и теплоты охлаждения газового двигателя. На рис. 7.41 сравнивается способность утилизировать энергию тепловых насосов с электрическим приводом и в двигателе внутреннего сгорания.

Тепловые насосы других типов. Имеется ряд тепловых насосов других типов, часть из которых находится в стадии разработки. Поскольку их применение в промышленности в настоящее время ограничено, нет необходимости описывать их подробно.

Термоэлектрический тепловой насос основан на прохождении электрического тока через соединение между двумя различными проводниками

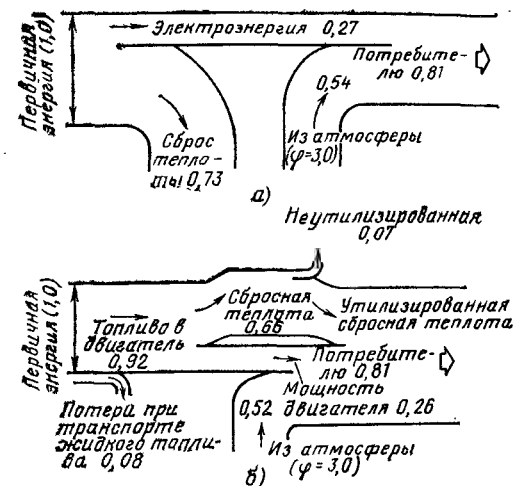


Рис. 7.41. Сравнение энергетической эффективности тепловых насосов, приводимых в действие электродвигателем (а) и двигателем внутреннего сгорания (б)

ми, при этом теплота либо поглощается, либо снимается в месте соединения в зависимости от направления тока. Замкнутая цепь должна состоять из двух таких соединений, а на втором соединении будет происходить противоположное явление. Таким образом, по мере прохождения тока по цепи теплота будет поглощаться на одном соединении и сниматься на другом. Этот эффект может быть довольно значительным при применении определенных комбинаций материалов.

В настоящее время эти устройства имеют очень низкую производительность, и ϕ существенно ниже, чем у парокомпрессионных тепловых насосов [7.41].

В машинах с абсорбционным циклом отсутствует компрессор. Механические процессы заменены химическими реакциями, и рабочая жидкость используется в сочетании со второй средой, известной как абсорбент, в котором рабочая жидкость хорошо растворяется. Раствор нагревают в генераторе, как показано на рис. 7.42, от внешнего источника теплоты. Выделяющиеся в генераторе пары с высокой температурой поступают в теплообменник, и жидкость возвращается в абсорбер. Давление рабочей жидкости снижается, и она испаряется в низкотемпературном теплообменнике, который работает так же, как испаритель с конденсацией паров. Затем пар повторно растворяют в абсорбенте.

Машины двух наиболее типичных типов с абсорбционным циклом, применяемые в качестве воздушных кондиционеров, работают на бромистом литии и воде или аммиаке и воде. Система с бромистым литием имеет максимальный ϕ и особенно пригодна в тех случаях, когда имеется сбросная теплота в виде пара для нагрева раствора в генераторе [7.42].

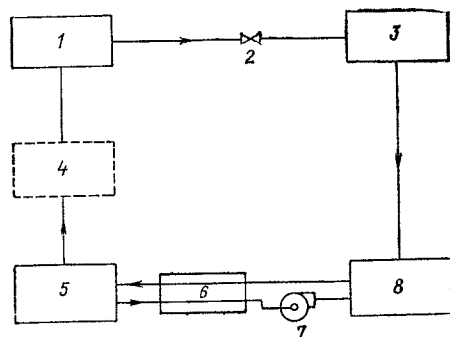


Рис. 7.42. Абсорбционный цикл теплового насоса:

1 — конденсатор; 2 — дроссель; 3 — испаритель; 4 — ректификатор (необходим в системах с летучими абсорбентами); 5 — генератор; 6 — теплообменник; 7 — насос; 8 — абсорбер

Институт Institute of Gas Technology в США в настоящее время проводит большое исследование тепловых насосов, основанных на циклах Ренкина, Стерлинга и Брайтона [7.43].

7.10. Теплообменники других типов

Большинство описанных ранее теплообменников специально предназначены для утилизации теплоты. Однако есть несколько других типов теплообменников, которые хотя главным образом применяются для охлаждения или нагрева, но могут одинаково эффективно применяться и для утилизации теплоты. Кроме того, имеется ряд теплообменников из таких материалов, которые значительно расширяют области их применения.

Кожухотрубчатые теплообменники сравнительно недорогие, если они выполнены из обычных материалов. Они могут применяться для утилизации сбросной теплоты технологических потоков. Эти теплообменники изготавливаются также с трубками из тефлона, главным образом для работы с кислотами, и могут быть также выполнены из графита. Кожухотрубчатые теплообменники применяются не только для утилизации сбросной теплоты жидкостей. В некоторых случаях поверхность трубок может быть увеличена, как показано на рис. 7.43 на примере теплообменника фирмы Lordan, что позволяет применять его для утилизации теплоты отработанных газов.

Как было показано ранее, теплообменники этого типа во многих областях применения конкурируют с пластинчатыми теплообменниками. Теплообменники фирмы Lordan могут быть изготовлены из недорогих материалов (вместо нержавеющей стали), и их преимущество состоит в том, что трубки изготавливают из нержавеющей стали, а кожух — из углеродистой. Кроме того, трубки могут быть выполнены из меди или сплава меди и никеля, а кожух и пластины — из углеродистой стали. Как указывает фирма D. J. Neil, имеется целый ряд факторов, благодаря которым может быть сделан выбор в пользу того или иного теплообменника:

в случае высокого давления необходимо применение теплообменников со спиральными трубками;

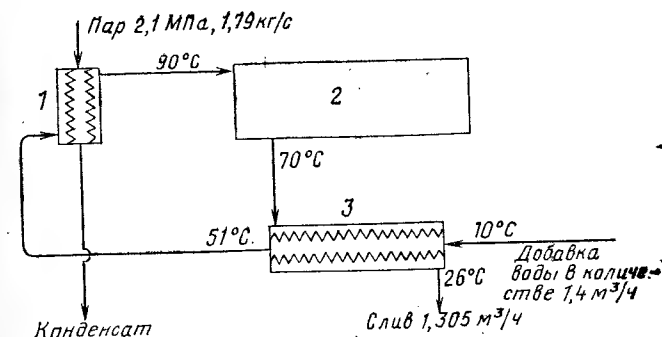


Рис. 7.44. Теплообменник со спиральными трубками фирмы Lordan, применяемый в качестве кипятильника и теплоутилизационного агрегата в посудомоечной машине:

1 — кипятильник; 2 — посудомоечная машина; 3 — подогреватель

Рис. 7.43. Кожухотрубчатый теплообменник фирмы Lordan, иллюстрирующий способ увеличения площади поверхности в заданном объеме

при неодинаковых первичных и вторичных потоках во многих случаях теплообменник со спиральными трубками будет дешевле и компактнее, чем эквивалентный пластинчатый теплообменник;

при перепаде температур менее 10% первичного перепада теплообменник со спиральными трубками дешевле, чем пластинчатый теплообменник.

Ниже приводятся сравнительные расчеты эффективного применения теплообменника со спиральными трубками, изготовленного фирмой Lordan для утилизации сбросной теплоты посудомоечной машины заводской столовой (рис. 7.44).

Пример. Заводская столовая на 600 чел. В течение года посудомоечная машина используется $7 \text{ ч} \cdot 365 = 2555 \text{ ч}$. Расход воды для машины составляет $1,4 \text{ м}^3/\text{ч}$, температура воды повышается с 10 до 90°C паром с давлением 0,2 МПа. Стоимость 1 т топлива равна 3,3 ф. ст.

При нагреве только паром количество теплоты составляет $1400 \text{ кг/ч} \cdot 80^\circ \text{C} = 0,47 \text{ Дж/ч}$, расход пара $3,66 \text{ кг/ч}$, затраты на топливо 1854 ф. ст/год, стоимость подогревателя 285 ф. ст.

При утилизации теплоты предварительно нагревают воду с 10 до 51°C сточными водами с температурой 70°C . Количество полезно используемой теплоты составляет $1400 \text{ кг/ч} \cdot 41^\circ \text{C} = 0,24 \text{ ГДж/ч}$. Затем воду нагревают с 51 до 90°C паром с давлением 0,2 МПа.

Количество затрачиваемой теплоты составляет $1400 \text{ кг/ч} \cdot 39^\circ \text{C} = 0,228 \text{ ГДж/ч}$, расход пара $1,79 \text{ кг/с}$, затраты на топливо 907 ф. ст/год.

Дополнительные капитальные затраты на оборудование для утилизации теплоты составляют 505 ф. ст.

В результате экономия затрат на топливо равна $1854 - 967 = 947 \text{ ф. ст/год}$, а общий период окупаемости — меньше года, несмотря на то что при проведении этого сравнения не учтена стоимость монтажа.

АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ

В последнее время все больший интерес вызывает возможность аккумулирования энергии. Большинство людей знакомы по крайней мере с одной формой аккумулирования энергии — это применение специальных радиаторов в домах для аккумулирования теплоты в базисе графика нагрузки. Аккумулированная в радиаторе теплота используется в течение последующих нескольких часов, при этом количество отводимой теплоты может регулироваться с помощью принудительной конвекции или другим способом.

В промышленности некоторые аккумуляторы применяются для аккумулирования пара высокого давления с последующим использованием его в технологических целях при низком давлении.

Известно также применение горячей воды в качестве аккумулируемой среды. Основное преимущество аккумулирования горячей воды по сравнению с другими средами состоит в том, что вода может быть использована и для аккумулирования теплоты, и как теплопередающая среда, при этом устраняется необходимость в теплообменнике. В настоящее время аккумуляторы теплоты известны не так широко, как котлы — аккумуляторы теплоты, которые, как видно из названия, могут применяться одновременно для получения теплоты и ее аккумулирования.

Разрабатываются и другие среды (твердые и жидкие) для аккумулирования теплоты, в частности в связи с использованием солнечной энергии, в которых происходят фазовые превращения. Они поглощают теплоту в процессе плавления и отдают теплоту в процессе затвердевания, таким образом, аккумулирующая способность такого материала зависит от скрытой теплоты его плавления. Типичным примером таких материалов является гидроксид натрия (соль).

Наряду с аккумулированием теплоты можно аккумулировать и некоторые другие виды энергии:

потенциальную энергию (энергию, получаемую в результате перекачивания воды на более высокую отметку, энергию сжатого воздуха и энергию гейзеров);

химическую энергию с использованием водорода в жидкой или газообразной форме или аккумуляторных батарей;

кинетическую энергию (с помощью маховых колес);

электромагнитную энергию (с помощью конденсаторов или сверхпроводящих магнитов).

Описание систем аккумулирования этих видов энергии проводится в [8.1].

8.1. Котлы-аккумуляторы теплоты

Такие котлы были разработаны для того, чтобы объединить функции котла и аккумулятора в одном агрегате. Типичным примером современного котла-аккумулятора теплоты является котел, производимый фирмой Babcock and Wilcox Ltd.

Принцип работы этого котла-аккумулятора теплоты (рис. 8.1) состоит в том, что при пиковой потребности в паре автоматически снижается или прекращается подача воды в котел. Уровень воды снижается, и физическая теплота котловой воды используется для получения дополнительного количества пара. Количество сжигаемого топлива остается постоянным, что обеспечивает высокий КПД котла. При снижении потребности в паре автоматически увеличивается количество воды, пода-

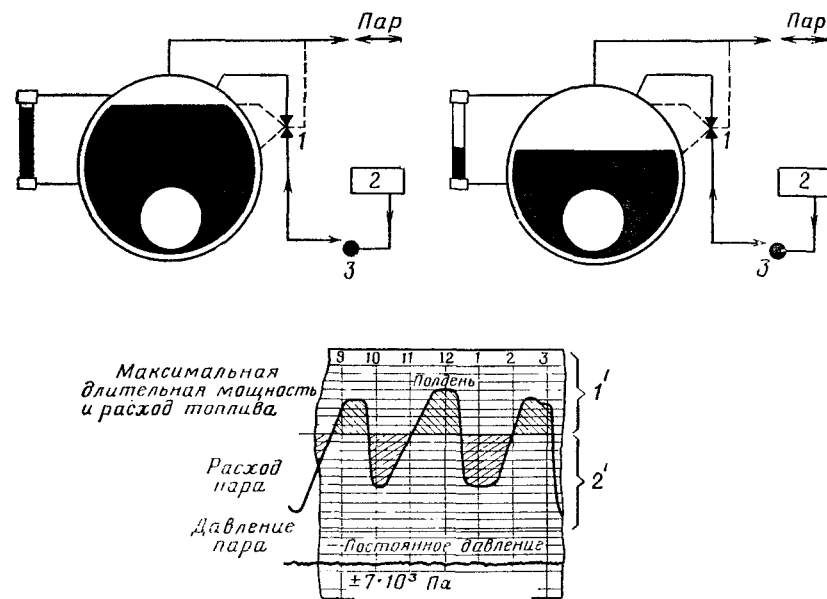


Рис. 8.1. Котел-аккумулятор теплоты фирмы Babcock and Wilcox Ltd:

1 — регулятор расхода питательной воды; 2 — конденсатор; 3 — питательный насос; 1' — питательный клапан открыт; 2' — питательный клапан закрыт

ваемой в котел, и теплота вновь аккумулируется в котле. Котел может также работать как обычный агрегат, когда изменение потребности в паре не может быть обеспечено с помощью описанных методов регулирования.

Котел может в течение часа покрывать тепловую нагрузку, на 33% превышающую номинальную. Так как количество сжигаемого топлива может поддерживаться постоянным в течение всего процесса, то температура газов в газоходе соответствует заданным значениям, так что не происходит конденсации газа на низкотемпературных поверхностях и последующей коррозии, как это имеет место при переменных режимах работы.

Второй тип котла — аккумулятора теплоты, в котором также устранены проблемы, возникающие при работе на переменных режимах, связан с применением системы Metro-Flex. Работа этого котла с производительностью 3200 кг/ч основана на усовершенствованных методах организации процесса горения, позволяющих поддерживать температуру газов в котле на сравнительно постоянном и высоком уровне.

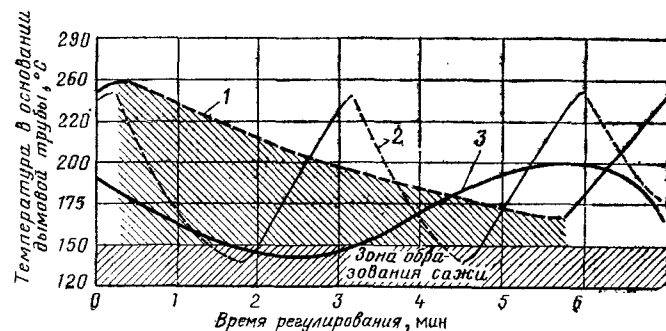


Рис. 8.2. Характеристики системы аккумулирования теплоты фирмы Metro-Flex (1) в сравнении с характеристиками двухпозиционной горелки (2) и горелки с регулированием (3)

не, что приводит к увеличению срока службы котла. Рисунок 8.2 иллюстрирует эффективность организации процесса горения с помощью этой системы в сравнении с применением обычных горелок с постоянной производительностью и с регулированием количества сжигаемого топлива при потребности в паре 450 кг/ч. Обычная горелка с постоянной производительностью выключается сравнительно часто, в результате

Таблица 8.1. Тепловые потери с горячей металлической поверхности*

Тепловые потери (диаметр трубы, мм)	Температура поверхности, °C	
	90	425
Уголь		
Потери, г/м, при диаметре труб, мм:		
25	0.13	2.07
50	0.26	3.12
200	0.75	12.00
Потери с плоской поверхности, т/м ²	1.18	19.69
Жидкое топливо		
Потери, л/м, при диаметре труб, мм:		
25	101.0	1471.0
50	164.0	2223.0
200	537.0	8579.0
Потери с плоской поверхности, л/м ²	881.0	14094.0
Газ		
Потери, МДж/т, при диаметре труб, мм:		
25	0.36	5.21
50	0.59	8.80
200	1.90	3.04
Потери с плоской поверхности, МДж/м ²	3.12	5.00

* В эквивалентном количестве каждого вида топлива в год.

через котел проходит холодный воздух, что соответственно приводит к перерасходу топлива. Горелка с регулируемым количеством сжигаемого топлива может не обеспечить при минимальных нагрузках достаточно высокой подачи теплоты для предотвращения охлаждения котла и топочных газов, что приводит к загрязнению и коррозии. Работа горелки системы Metro-Flex обеспечивает сжигание топлива с высокой эффективностью при номинальной производительности, а когда горелка отключается, система функционирует таким образом, что холодный воздух не может проходить в зону горения. Потери теплоты из котла сводятся до минимума, и он работает как аккумулятор теплоты. Полученная экономия составляет обычно 5—6% стоимости топлива, но на одной установке, работающей на жидком топливе, была достигнута экономия 9,8% благодаря предотвращению потерь при останове.

8.2. Теплоизоляция

Распространенной формой теплоизоляции является кожух из волокнистого материала вокруг емкости или трубы с горячей жидкостью, и в большинстве случаев эта форма сохраняется и в настоящее время. В зданиях для теплоизоляции может применяться стекло, а в промышленных процессах в последнее время поверхность горячей жидкости покрывают слоем пластмассовых шариков.

Теплоизоляционные материалы. Обычным видом теплоизоляции в промышленности является волокнистый материал, который применяется для обшивки трубопроводов и емкостей. Имеется большое количество теплоизоляционных материалов, которые значительно отличаются по стоимости, теплопроводности и рабочим температурам. Наиболее важным фактором является правильное определение толщины изоляции. Фирма Fibreglass Ltd. в Великобритании выпускает руководство для расчета оптимальной толщины с учетом экономии теплоты и стоимости материала в соответствии с графиком, представленным на рис. 8.3.

В табл. 8.1 приводятся потери в окружающую среду эквивалентного количества топлива [8.4] в зависимости от температуры и диаметра, а также площади поверхности плоской трубы.

Выбор типа изоляции, в том числе ее характеристик, зависит от среды, в которой она находится. Важно, чтобы изоляционный материал обладал хорошей стойкостью к воде и водяному пару, если он применяется снаружи здания или под землей. Если изоляция не защищена, то при морозе она может быть повреждена. Высокое содержание влаги будет также оказывать вредное влияние на теплоизоляционные свойства. Должен быть установлен допуск на усадку и срок службы изоляции в условиях вибрации, тепловых колебаний и возможного механического повреждения. При применении теплоизоляционного покрытия необходимо учитывать тот факт, что в будущем может возникнуть необходимость удалить его для ремонта трубопровода, фланцев или вентиля (важно, чтобы изоляционное покрытие было нанесено на все части трубопровода, включая фланцы и вентили). Для получения доступа к трубе теплоизоляция должна быть снята очень аккуратно, чтобы ее

можно было снова использовать. Теплоизоляция с наружной металлической обшивкой может состоять из двух половин и крепиться вокруг трубы с помощью зажимов, что дает возможность легко снимать ее и повторно использовать.

Большинство теплоизоляционных материалов сравнительно инертны и безопасны при применении. В тех случаях, когда существует определенная опасность загорания или химического воздействия, может потребоваться специальная обработка изоляционного материала, и изготовители должны быть готовы дать рекомендации по этим вопросам.

Экономия, полученная за счет теплоизоляции резервуаров хранения топлива и горячей воды, а также трубопроводов возврата конденсата, для трех заводов фирмы Esso Petroleum, приводится в табл. 8.2 [8.5].

Теплоизоляция поверхностей горячих жидкостей. Способ, разработанный фирмой Cupricorn Industrial Services of London и известный как система Allplas, оказался наиболее эффективным для сведения к минимуму тепловых потерь с поверхностей горячих жидкостей. Система Allplas основана на применении полых полипропиленовых плавающих шариков, обеспечивающих почти полное покрытие поверхности жидкости. Эти шарики обладают стойкостью к большинству кислот и других промышленных жидкостей и могут применяться при температурах гораздо выше температуры кипения многих обычных жидкостей. Они имеют тенденцию размягчаться при температуре 120—145 °С.

Многие фирмы, применяющие шарики Allplas, сообщали об обильной экономии топлива, полученной за счет их использования в открытых емкостях, нагреваемых для поддержания заданной температуры. Чтобы точно установить экономию в контролируемых условиях, лаборатория National Engineering Laboratory в г. Ист Килброуд провела ряд исследований. Испытания проводились в открытой емкости, стенки и днище которой были изолированы полиуретановой пеной, так что тепловые потери с этих поверхностей были минимальными. Количество теплоты, необходимой для поддержания заданной температуры в течение заданного периода времени, определяли для одного слоя

Таблица 8.2. Экономия, полученная при применении теплоизоляции

Объект	Тепловые потери, ГДж/г	Экономия энергии при применении теплоизоляции, ГДж/г	Эквивалентная экономия жидкого топлива, л
Резервуар для хранения топлива	1561	1108	33 600
Резервуар горячей воды и трубопровод возврата конденсата	2791	2216	54 500

и для двух слоев шариков. При постоянной температуре воды 90 °С тепловые потери были сокращены на 69,5 % при одном слое шариков и на 75,5 % при двух слоях.

В промышленных условиях теплоизоляция редко бывает такой эффективной, и обычно большое количество теплоты теряется при погру-

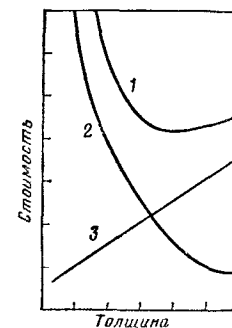


Рис. 8.3. Выбор оптимальной толщины теплоизоляции
1 — общая стоимость; 2 — стоимость потерь теплоты; 3 — стоимость изоляции

жении холодных и извлечении горячих компонентов из емкости. Экономия топлива в промышленных условиях при одном слое шариков обычно составляет около 50 %. Кроме экономии топлива система Allplas помогает поддерживать равномерную температуру в растворе, что очень важно для многих промышленных процессов.

Во многих промышленных процессах желательно полностью устранить потери раствора в результате испарения. В отчете упомянутой лаборатории показано, что для температуры 80 °С испарение воды снижается на 88 % при одном слое шариков. Два слоя сокращают испарение на 89 %. Эти цифры относятся к системам кондиционирования воздуха. Благодаря значительному снижению образования паров при использовании системы Allplas часто можно отключать вентиляторы, уменьшая эксплуатационные расходы, а также общую нагрузку системы кондиционирования [8.6].

8.3. Среды, аккумулирующие теплоту

Аккумуляирование явной теплоты. Бак с горячей водой, используемый в большинстве домов в качестве аккумулятора теплоты, может также применяться в промышленных зданиях.

Таблица 8.3. Свойства сред, аккумулирующих теплоту [8.9]

Материалы и сплавы	Температурный предел аккумуляирования теплоты, °С	Зарядная емкость, кВт·ч/м³	Материалы и сплавы	Температурный предел аккумуляирования теплоты, °С	Зарядная емкость, кВт·ч/м³
Оливейт, форсгрит	250—750	395	Сплав чугуна	250—750	565
Магнетит	250—750	437	Расплавленная соль	250—750	640
Фео-лит	250—750	512	Алюминий	250—750	664

Основное преимущество использования для аккумуляирования теплоты воды состоит в том, что не требуется теплообменника (за исключением тех случаев, когда необходимо отдавать теплоту в систему циркуляции горячего воздуха). Здесь теплоноситель и аккумулятор теплоты совмещены в одной среде. Баки-аккумуляторы для жидкости могут быть различных размеров, и эту систему сравнительно просто выполнять.

Такой бак можно использовать и для накопления сбросной теплоты. В промышленности можно в таких аккумуляторах как накапливать пар, так и использовать его для нагрева воды. При использовании водяных баков-аккумуляторов важную роль играет система контроля и регулирования. В бак не следует подавать холодную воду, потому что холодная вода сразу же опускается вниз, вытесняя горячую воду наверх, и с температурного датчика поступает сигнал для включения парового обогрева. В более эффективной системе предусмотрен регулятор температуры, который обеспечивает нагрев воды в баке до подачи холодной воды. Регулирование необходимо также для обеспечения прекращения подачи воды, когда бак полный, а также для прекращения подачи пара при достижении максимальной температуры [8.7]. В хорошем баке-аккумуляторе, обогреваемом паром, можно быстро достигнуть равномерной температуры. Он может быть изготовлен из пластмассы, меди или гальванизированной мягкой стали.

Управление General Electricity Generating Board провело исследование по аккумулярованию явной теплоты с целью обеспечения работы электростанции при постоянной тепловой мощности независимо от электрической нагрузки, а также быстрого удовлетворения колебания нагрузки [8.8]. В данном исследовании в качестве среды, аккумулирующей теплоту, была рассмотрена главным образом вода, а также жидкий натрий (вместе с ядерным реактором на быстрых нейтронах). В результате исследований пришли к выводу, что вода является экономически выгодной средой для аккумулярования теплоты для электростанций, а от натрия следует отказаться из-за высокой стоимости его в настоящее время.

Обычное явление в отопительных системах — аккумулярование теплоты в твердой среде. Недавно комиссией Electricity Council было проведено исследование [8.9] твердых и жидких сред (табл. 8.3), которые можно применять при более высоких температурах, чем получить в системах аккумулярования воды.

Для этой цели можно было бы применять расплавы солей и алюминия. Однако ограничения по безопасности заставили отказаться от них в настоящее время несмотря на их относительно низкую массу, приемлемую стоимость и высокую аккумулялирующую способность.

Из имеющихся твердых сред наилучшими материалами для аккумулярования теплоты являются керамические и сплавы на основе чугуна. Однако максимальная рабочая температура определяется другими факторами, такими как характеристики теплоизоляции и срок службы нагреваемой среды; отвод теплоты также зависит от теплопроводности материала кожуха. На опытной установке в качестве аккумулялирующей среды был выбран чугун, хотя если бы к тому моменту уже был разработан феолит, то был бы использован именно этот материал. Феолит — спекшийся оксид железа; изготавливается в форме кирпича и разработан специально для применения в системах аккумулярования теплоты. Он дешевле чугуна и может применяться при температурах до 1000 °С.

Эта система была впервые применена в промышленных масштабах

и уже работает в течение нескольких лет на заводе по производству алкидной смолы.

Алкидную смолу, основной ингредиент лаков, получают в герметичных котлах из нержавеющей стали. Эта демонстрационная установка, построенная для системы аккумулярования теплоты, имеет вместимость 1,6 м³ и максимальную рабочую температуру 260 °С. Нагрев начинается сразу же после загрузки реагентов в котел и продолжается до достижения заданной рабочей температуры. Скорость повышения температуры смолы 1 °С/мин. Мощность в начале процесса нагрева составляет около 190 кВт и постепенно снижается по мере снижения температуры аккумулялирующей среды и повышения температуры смолы. Затем температура в котле поддерживается на постоянном уровне, для того чтобы произошли необходимые реакции и возврат флегмы. Необходимая для процесса теплота аккумулируется в 7000 кг специальных чугунных блоков, выдерживающих высокую температуру. Этот аккумулятор при пористости около 30% имеет внутреннюю поверхность теплопередачи площадью 32 м². Аккумулятор (рис. 8.4) нагревают ночью от источника мощностью 80 кВт в течение 7,5 ч для накопления теплоты в количестве около 2 ГДж. Днем эта теплота передается циркулирующим по замкнутой системе воздухом от аккумулятора теплоты к технологическим аппаратам. Температура смолы быстро регулируется в пределах $\pm 1,5$ °С от заданной рабочей температуры с помощью включения или выключения вентилятора. Весь процесс длится 8—10 ч.

Было определено, что капитальные затраты на систему аккумулярования теплоты на установке по производству смолы такие же, как на установку, работающую на жидком топливе, и эксплуатационные расходы на литр продукта такие же, как для жидкого топлива или немного ниже, хотя система, работающая на газовом топливе, имела бы более низкую первоначальную стоимость (70% стоимости системы аккумулярования теплоты), эксплуатационные расходы были бы на 50% выше, чем для новой системы. Другие преимущества этой системы — простота и легкость при ремонте.

Среды, аккумулялирующие теплоту плавления. Так же как в методах аккумулярования явной теплоты, рассмотренных в предыдущем разделе, зарядная емкость сред, аккумулялирующих теплоту плавления или скрытую теплоту, зависит от объема. В последнем случае объем зависит от скрытой теплоты плавления применяемого материала. В отличие от системы аккумулярования явной теплоты среда, аккумулялирующая теплоту плавления, отдает или поглощает теплоту при постоянной или почти постоянной температуре. Однако для этого она должна менять свою фазу. При получении теплоты материал плавится и отдает теплоту при повторном затвердевании. Скрытая теплота плавления материала в принципе позволяет получить в единице объема больший заряд теплоты, чем явная. Типичные характеристики различных сред приведены в табл. 8.4.

Несмотря на высокую теплоаккумулялирующую способность материалов этого типа, имеется несколько недостатков, связанных с их применением, которые делают менее целесообразным их применение, по крайней мере, в ближайшем будущем, в промышленных масштабах. При-

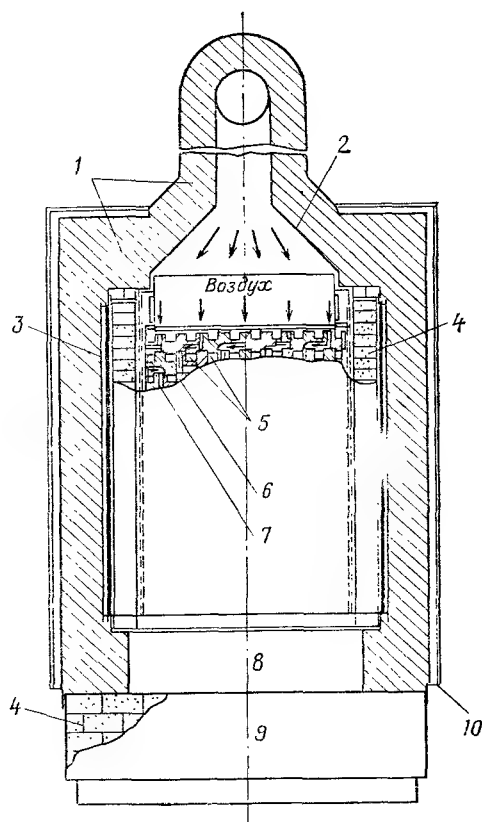


Рис. 8.4. Аккумулятор теплоты на установке по производству смол:

1 — теплоизоляция фирмы Rockwall; 2 — вход; 3 — корпус камеры; 4 — огнеупорные блоки; 5 — каналы для нагревательных элементов; 6 — блоки аккумулятора теплоты; 7 — проходы для воздуха; 8 — коллектор; 9 — цоколь; 10 — стальной корпус

веденные в табл. 8.4 материалы имеют довольно ограниченную рабочую температуру, что делает их более пригодными для систем отопления жилых зданий, хотя возможно их применение вместе с тепловыми насосами. Для промышленного применения был предложен сульфид германия, имеющий температуру эвтектики 590 °C [8.12]. К сожалению, германий в настоящее время стоит очень дорого, но регенерация его из летучей золы в промышленных масштабах могла бы сделать такую систему более конкурентоспособной.

Одной из наиболее сложных проблем при проектировании аккумулирующей системы этого типа является объединение ее с теплообменником. Приведенные в табл. 8.4 материалы расширяются при плавлении и имеют положительный коэффициент расширения в жидкой фазе. Материал этого типа трудно использовать для передачи теплоты в емкость, поскольку жидкость находится над твердой фазой и сама горячая жидкость — в верхнем слое. Расположение теплообменника сверху было бы нежелательно, поскольку конвекция не способствовала бы теплопередаче, а переход теплоты вниз в материал с твердой фазой шел бы очень медленно. Расположение теплообменника в твердой фазе мог-

Таблица 8.4. Среды, аккумулирующие теплоту плавления [8.10, 8.11]

Материалы	Температура плавления, °C	Плотность, кг/м³	Теплота плавления	
			Дж/л	Дж/см³
$\text{Na}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	58	1297	265	340
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	48	1650	209	344
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	47	1858	174	283
P116 (воск)	47	785	209	163
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	36	1617	223	359
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	36	1522	265	400
$\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	30	—	307	440

ло бы создать проблемы, связанные с напряжением, возникающим при изменении объема при плавлении.

В [8.12] высказано мнение, что применение полупроводниковых материалов, для многих из которых характерно уменьшение объема при плавлении, могло бы устранить эту проблему. Твердая фаза будет находиться над жидкой фазой, и если расположить теплообменник внизу аккумулятора, то конвекция могла бы способствовать и подаче, и отводу теплоты.

Глава 1

- 1.1 Energy Trends. Publ. Economics and Statistics Division, Department of Energy, UK, Feb. 1976.
- 1.2 Swiss, M. Energy and the Future. Chartered Mechanical Engineer pp 99 - 104, Sept. 1974.
- 1.3 Senior, J. Coal Utilisation in Industry. Heating and Air Conditioning Journal, July 1974.
- 1.4 Rubin, E.S. Research and Development Needs for Enhancing US Coal Utilisation. Paper 749160, 9th Intersoc. Energy Conversion Engineering Conference, San Francisco, August 1974.
- 1.5 Energy for Europe: Research and Development. Bulletin of the European Communities, Supplement 5/74, Brussels, April, 1974.
- 1.6 Coal Industry Examination, Final Report. Department of Energy, UK, 1974.
- 1.7 Coal gasification. Mosaic (Publ. US National Science Foundation), 5, 2 (1974).
- 1.8 Grainger, L. Future Trends in Utilisation of Coal Energy Conversion. Energy Digest, pp 3-5, Jan/Feb. 1974
- 1.9 Coppack, C.P. Energy in the 1980's. Natural Gas. The Royal Society London (1973)
- 1.10 Hawthorne, W.R. Energy: A Renewed Challenge to Engineers. Proc. Inst. Mech. Eng. 189, 52/75, Dec. 1975.
- 1.11 Varley, E.G. Minutes of Evidence to the Select Committee on Science and Technology, (Energy Resources Sub-Committee) HMSO, London, 12 March, 1975.
- 1.12 Rooke, D.E. Future Trends in Gas Production and Transmission. Phil. Trans. of The Royal Society, London, A276, 547-558 (1974).
- 1.13 Towards a New Energy Policy Strategy for the European Community. Bulletin of the European Communities, Supplement 4/74, Brussels (1974)
- 1.14 Drake, E. Oil Reserves and Production. Phil. Trans. of The Royal Society, London, A276, 453-462 (1974)
- 1.15 Hottel, H.C. and Howard, J.B. New Energy Technology - some facts and Assessments. Mass. Inst. Tech. (1971).
- 1.16 Dalal, V. Environment, Energy and the Need for New Technology. Energy Conversion, 13, 85-94 (1973).
- 1.17 Minerals Yearbook, US Bureau of Mines, Publ. U.S. Dept. of the Interior, (1969).
- 1.18 Westinghouse Electric Corporation, in Advanced Power Cycles. Hearings before the Committee on Interior and Insular Affairs, US Senate, 92-21 pp 243-256, 1971.
- 1.19 Bowie, S.H.U. Natural Sources of Nuclear Fuel. Phil. Trans. of The Royal Society. London, A276, 495-505 (1974).
- 1.20 Anon. Uranium Resources, Production and Demand. NEA/IAEA Compilation, OECD Paris (1973).

Глава 2

- 2.1 Anon. Energy Conservation. A study by the Central Policy Review Staff, HMSO, London, (1974).
- 2.2 Kolbusz, P. The use of heat pumping in district heating schemes. Electricity Council Research Centre Report ECRC/M700, Feb. 1974.
- 2.3 Furlong, W.K. and King, L.D. Beneficial uses of waste heat - status of research and development in the USA. Proc. Joint USA/USSR Conf. on Heat Rejection Systems, Washington, D.C., June 17 - 19, 1974.
- 2.4 Anon. Electricity Generation. Electricity Council Publication EC 3124, London, Oct. 1973.
- 2.5 Stocks, W.J.R. Total energy. Publicity Data of Ruston Gas Turbines Ltd., P.O. Box 1, Lincoln, England.
- 2.6 Levers, W.H. The electrical engineer's challenge in energy conservation. IEEE Trans. on Industrial Applications, IA-11, 4, (1975)
- 2.7 Ennis, W.D. Vapours for Heat Engines. D. Van Nostrand, New York, (1912)
- 2.8 Wood, B.D. Applications of Thermodynamics. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, (1969)
- 2.9 Mitchell, R.W.S. and Gasparovic, N. Total energy. Steam and Heating Engineer, pp 34 - 39, July 1973.
- 2.10 Karim, G.A. and Souza, M.V. Combustion of methane with reference to its utilisation in power systems. J. Inst. of Fuel, 45, 335 - 339 (1972)
- 2.11 D'Amour, R.A. Natural gas engines as prime movers for air conditioning. SAE Paper 876A, Society of Automotive Engineers, New York, (1974)
- 2.12 Anon. Gas Engineers Handbook. The Industrial Press, New York, (1965)
- 2.13 Butler, P. A showpiece to save money by promoting waste heat recovery. The Engineer, 239, 23 Oct. 1975.
- 2.14 Horsler, A.G. et al. Natural gas fuelled prime movers in the United Kingdom. British Gas Corporation Research Report MRS E 235, Feb. 1974.
- 2.15 Jones, R.A. Caterpillar on total energy. Diesel Engineers and Users Assn., Publ. 345, London (1972)
- 2.16 Diamant, R.M.E. Total Energy. Pergamon Press, Oxford, (1965)
- 2.17 Shearer, A. Selection of prime movers for on-site energy generation. Power Generation Industrial, No. 3, May 26, 1976.

Глава 3

- 3.1 Anon. Energy Conservation. A Study by the Central Policy Review Staff, HMSO, London (1974)
- 3.2 Anon. Technology of efficient energy conservation. Report of a NATO Science Committee Conference, France. (NATO Scientific Affairs Div.) Oct. 1973.
- 3.3 Toyoda, S. Energy in the steel industry. Metals Engineering Quarterly, May 1975.

- 3.4 Gray, A.G. Steels for energy survival. Metal Progress, October 1975.
- 3.5 Anon. Energy conservation in the UK - achievements, aims and options. National Economic Development Office. HMSO, London 1974
- 3.6 Sjoerdsma, A.C. and Over, A.J. Energy conservation - ways and means. Future Shape of Technology Publications, No. 19, The Netherlands, (1974)
- 3.7 Friedl, R. Saving energy in steelmaking. Metals Engineering Quarterly May 1975.
- 3.8 Smith, E.J. Present and future of coal in steelmaking. Metals Engineering Quarterly, May 1975
- 3.9 McChesney, H.R. Recovery of heat from metal processing furnaces. Paper 7, Waste Heat Recovery Conference, Inst. Plant Engineers, London, 25 - 26 Sept. 1974.
- 3.10 Jones, A. Energy economy within B.S.C. British Steel, pp 12 - 16, Spring 1974
- 3.11 Winkworth, D.A. and Blundy, R.F. Trends and new developments in high temperature air preheater equipment. Iron and Steel Institute Slab Reheating Conference Proc., pp 117 - 126, June 1972.
- 3.12 Drost, J.J. et al. Thermal energy recovery by Basic Oxygen Furnace offgas preheating of scrap. Bureau of Mines Report RI 7929, US Department of the Interior, (1974)
- 3.13 Chatterjee, A. Economics of preheated scrap usage in the LD process. Iron and Steel Internat., pp 325 - 331, August 1973.
- 3.14 Laws, W.R. Prospects for scrap preheating for the Basic Oxygen Furnace. Steel Times, pp 679 - 682, Sept. 1972.
- 3.15 Fidler, J. Aluminium at half the price - if Toth's idea will scale up. The Engineer, 237, 6125/6, 38 - 40 (1973)
- 3.16 Pettman, M.J. and Humphreys, G.C. Improve designs to save energy. Hydrocarbon Processing, 54, 1, 77 - 81 (1975)
- 3.17 Mol, A. Which heat recovery system? Hydrocarbon Processing, 52, 7, 109 - 112, (1973).
- 3.18 Quartulli, O.J. and Wagener, D. Technologie der Ammoniaksynthese in Vergangenheit. Gegenwart und Zukunft. Erdöl und Kohle, 26, 4, 192 - 198, (1973)
- 3.19 Bolton, D.H. and Hanson, D. Economics of low pressure in methanol plants. Chemical Engineering, pp 154 - 158, Sept. 1969.
- 3.20 Reistad, G.M. Available energy conversion and utilisation in the United States. Trans. ASME, Journal of Engineering for Power, pp 429 434, July 1975.
- 3.21 Anon. Oil and Australia, 1974 - The figures behind the facts. Petroleum Information Bureau (Australia), (1975).
- 3.22 Anon. The Petroleum Handbook, Shell International Petroleum Co. Ltd. London, 1966.

Глава 4

- 4.1 Anon. Energy conservation in the UK - achievements, aims and options. National Economic Development Office, London HMSO (1974)
- 4.2 Over, A.J. and Sjoerdsma, A.C. Energy conservation - ways and means. Future shape of Technology Publications, No. 19, The Netherlands (1974)
- 4.3 Anon. Technology of efficient energy utilisation. Report of a NATO Science Committee Conference, France. (NATO Scientific Affairs Division), Oct. 1973
- 4.4 Newton, G.E.H. Fuel and productivity in the pulp and paper industry Paper 11. Fuel and Productivity Conference, London 1963.
- 4.5 Webzell, A.B. Energy utilisation in the paper industry. Combustion 44, 8, 36 - 42 (1973)
- 4.6 Frei, D. Gas turbines for the process improvement of industrial thermal power plants. Sulzer Technical Review, 56, 4, 195 - 200 (1975)
- 4.7 Frei, D. and Holik, H. Total energy supply systems for paper mills. Sulzer Technical Review, 55, 3, 189 - 194 (1973)
- 4.8 Minett, P. Radio frequency and microwave heating saves labour and energy. Electrical Review, 5 Dec. 1975
- 4.9 Anon. Energy saving: The fuel industries and some large firms. Energy Paper No. 5, Department of Energy, HMSO, London (1975)
- 4.10 Meyers, P.G. The potential for energy conservation in the pulp and paper industry. Paper Trade Journal, pp 68 - 71, 17 - 24 Feb, 1975.
- 4.11 Reding, J.T. and Shepherd, B.P. Energy consumption: Paper, stone, clay, glass, concrete and food industries. Dow Chemical Company Environmental Protection Technology Series. Report EPA-650/2-75-032 -c, April, 1975
- 4.12 Annual Report, 1975. The British Glass Industry Research Association, Sheffield (1975)
- 4.13 Budov, V.M. and Seskutov, Yu.V. Use of waste gas heat in waste heat boilers. Glass and Ceramics (USA) 31, 7 - 8, 567 - 568 (1974)
- 4.14 Anon. Dry compressed air in glass manufacturing. Glass Industry (US) 40, 689, (1959)
- 4.15 Fuller, R.A. Lehr design for energy conservation. Ceramic Bulletin (US), 54, 3, 277 - 279 (1975)
- 4.16 Gibbs, M.G. et al. Thermal storage for industrial process heating. Electricity Council Research Centre, Capenhurst Report ECRC/M504, Sept. 1972.
- 4.17 Hawkins, A.E. and Cowper, J.E. Research at Unilever Research Laboratory, Colworth/Welwyn. Chemistry & Industry, 45, 1426 - 32 (1970)
- 4.18 Anon. Radio telemetry equipment. Food Research Association Leaflet No. 8, June 1973
- 4.19 Steele, D.J. Radio telemetry; the development of this technique to measure product temperatures in closed or continuously moving equipment. Food Research Association, Research Report. No. 186, undated.

- 4.20 Starkie, G.L. Some aspects of energy conservation in dairy process plant. J. Society of Dairy Technology, 28, 3 (1975)
- 4.21 Bunt, B.P. The energy used by packaging and its minimization. J. Society of Dairy Technology, 28, 3 (1975)
- 4.22 Cartwright, K. Modern air conditioning for the textile industry. Textile Month. May 1975.
- 4.23 Sundaram, S. Effective use of heat energy in textile finishing. Colourage, April 18, 1974
- 4.24 Gillies, J. Heat storage and waste heat recovery. The Plant Engineer 14, 11, (1970)
- 4.25 Ward, J.S. How fast can you dye? International Textile Machinery, Supplement to Textile Month, 1973.
- 4.26 Anon. Package dyeing - the future way. Textile Month, Jan. 1975.
- 4.27 Anon. Reducing steaming costs in fabric print fixation. Textile Month, August 1975
- 4.28 Coleman, J.J. Waste water heat reclamation. Trans. ASHRAE, Pt 1, 370 - 384 (1974)
- 4.29 Killebrew, J.B. State of the art of laundry water heating. Trans. ASHRAE, Pt. 1, 363 - 369 (1974)
- 4.30 Angelery, H.W. Meeting maximum energy demands with minimum average energy input rate in water heating systems. Trans. ASHRAE, Pt. 1, 385 - 389 (1974)
- 4.31 Anon. Implications of higher energy costs for the textile industry. The Textile Institute and Industry, 12, 2 (1974)

Глава 5

- 5.1 Schoenberger, P.K. Energy saving techniques for existing buildings. Heating, Piping & Air Conditioning, pp 98 - 105, Jan. 1975
- 5.2 Loten, A.W. Energy conservation in the Property Services Agency. Building Serv. Eng. Vol. 43, Aug. 1975
- 5.3 Coad, W.J. The computer as a tool for energy analysis. Heating, Piping & Air Conditioning, pp 46 - 50, Jan. 1975.
- 5.4 Anon. Computer-controlled HVAC system helps cut energy usage in glass-walled office building. Edison Electric Institute Energy Management Case Study 12, New York, 1974.
- 5.5 Lyle, O. The Efficient Use of Steam. HMSO, London, (1956)
- 5.6 Kurz, G. and Carnegie, I.L. Submerged combustion burners. Process Engng., Jan. 1969
- 5.7 Anon. New burners for old. Processing, pp 38 - 39, May 1975.
- 5.8 Bryan, D.J. et al. Applications of recuperative burners in gas-fired furnaces. Inst. Gas Engineers, Communication 952, Proc. 40th Autumn Research Meeting, London, Nov. 1974.

- 5.9 Reed, R.J. Fuel/air ratio control systems. Industrial Process Heating pp 14 - 17, April, 1972
- 5.10 Lindsley, D.M. Automatic combustion controls for smaller or older installations. The Heating & Air Conditioning Journal, pp 24 - 27, May 1974.
- 5.11 Weinberg, F.J. The first half-million years of combustion research and today's burning problems. Progress in Energy and Combustion Science, 1, 17 - 32, (1975).
- 5.12 Anon. Enlarging the capacity of cooling towers. The Heating & Air Conditioning Journal, Sept. 1974
- 5.13 Foster, C.R. and Kloiber, F. Fuel conservation, National Asphalt Pavement Association Report, 1974
- 5.14 Dickson, P.E. Heating and drying of aggregate. National Asphalt Pavement Association Report, April 19, 1971.
- 5.15 Foster, C.R. Heating and drying of aggregates - Btu requirements and exhaust volumes. NAPA Information Series 47, 1973.
- 5.16 Silverthorne, P.N. Power factor correction for energy conservation. ASHRAE Journal, pp 28 - 32, May 1975
- 5.17 Coombs, V.T. The possibility of energy saving by the correct sizing of electric motors. Electrical Review, pp 744 - 746, Dec 5, 1975
- 5.18 Sanders, P.K. Are you paying too much for your energy supplies? Bradford Chamber of Commerce Journal, 1, 4 (1974)
- 5.19 Beatson, C. How to save power in furnaces with lightweight refractory The Engineer, pp 48 - 49, April 24, 1975
- 5.20 Anon. Energy saving: The fuel industries and some large firms. Energy Paper No. 5, Department of Energy, HMSO, London, (1975)
- 5.21 Anon. Essentials of good lighting. A simple guide for industry. The Electricity Council, London (1974)
- 5.22 Anon. Manage to save it - Efficient lighting. The Lighting Industry Federation, London, 1975.
- 5.23 Beardsley, C.W. Let there be light, but just enough. IEEE Spectrum, 12, 12, pp 28 - 34 (1975)
- 5.24 Ulrich, O.E. Using steam traps effectively. Plant Engineering (US) Feb. 21, 1974
- 5.25 Humphrey, R.C. Standard Oil of California stresses steam savings, improved firing, in all refineries. Power, Nov. 1973.
- 5.26 Henson, C.G. Furnace technology - Increasing the efficiency and quality of heat treatment. Metallurgia and Metal Forming, Aug. 1972
- 5.27 Spear, M. Burner fuel additives. Processing, pp 35, 37, May 1975
- 5.28 Henson, C.G. Furnace technology - Fuels and fuel economy. Metallurgia and Metal Forming, July 1973
- 5.29 Anon. Fuel additive can save 5% in costs. Maintenance Engineering. pp 24 - 27, Oct. 1974.
- 5.30 Anon. An experimental evaluation of Rolfite fuel oil additive in domestic heating systems. Report of the Rolfite Company, May 1975.

Глава 6

- 6.1 Anon. Heat recovery in air conditioned buildings. The Electricity Council, Publication EC2893, London, 1974.
- 6.2 Anon. Design concepts for optimum energy use in HVAC systems. The Electric Energy Association, Publication EEA-209, New York (1975)
- 6.3 Friedlander, G.D. Energy conservation by redesign. IEEE Spectrum, 10, 11, 36-43 (1973)
- 6.4 Anon. Heat transfer lighting fittings for integrated environmental design (IED). Osram-GEC Hirst Research Centre Report (1973)
- 6.5 Patel, K.N. and Murphy, W.J. Storage water application and service water supply systems to heat recovery. ASHRAE Journal, 16, 52 - 55, (1974)
- 6.6 Drummond, W.A. Economics of waste heat recovery from boiler flue gases The Plant Engineer pp 11 - 15, Feb 1975.
- 6.7 Glenn, R.D. Energy conservation opportunities in steam use. US National Bureau of Standards. Special Publication No. 403, Vol. II, Washington, D.C. (1973).
- 6.8 Urbani, A.C. Boiler blowdown and the economic viability of heat recovery. Proc. I. Mech. E. Conference on Energy Recovery in Process Plant, London, Paper C.20/75, 29-31, Jan 1975.
- 6.9 Danilov, B. Utilisation of steam boiler blow down. Processing May, 1975.
- 6.10 Bryan, D.J. et al. Applications of recuperative burners in gas-fired furnaces. The Institution of Gas Engineers, Communication 952, London, Nov. 1974.
- 6.11 Harrison, W.P. et al. The design of self-recuperative burners. J. Inst. Gas Engineers, 10, 538 - 563 (1970)
- 6.12 Berry, M.R. et al. A dry materials heat exchanger with regeneration. Trans ASME. J. Heat Transfer, Paper 73-WA/HT-14, pp 518 - 523, Nov. 1974
- 6.13 Mills, L. Recover waste heat systematically. Power, pp 36 - 37, Dec. 1972.
- 6.14 Dickson, P.F. Heating and drying of aggregate. US National Asphalt Pavement Association, April, 1971.
- 6.15 Kolbusz, P. Industrial applications of heat pumps. The Electricity Council Research Centre, Capenhurst. Report ECRS/N845, Sept. 1975.
- 6.16 White, A. Batch type fluid bed dryers. Chemical Processing, Aug. 1974
- 6.17 Horsley, M.E. Principles of waste heat recovery. Proc. Waste Heat Recovery Conference, The Institution of Plant Engineers, London Sept. 1974.
- 6.18 Williams, P.N. Two independently fired cupola blast heaters. Foundry Trade Journal, Feb 29th, 1968.
- 6.19 Leyshon, H.J. and Selby, M.J. Improved cupola performance by correct distribution of the blast supply between two rows of tuyeres. The British Foundryman, pp 43 - 55, Feb. 1972.

- 6.20 Anon. Big energy savings in iron foundries from BCIRA development. Press Release, British Cast Iron Research Association, July, 1975.
- 6.21 Anon. Electric melting for iron and steel foundries. The Electricity Council, Publication EC3128, London, Nov. 1973.
- 6.22 Ban, T.E. Effective energy utilisation from direct electric ironmaking Proc. Conf. on Energy - Use and Conservation in the Metals Industry. The Metallurgical Society of AIME, New York (1975)
- 6.23 Grigorev, V.N. and Gusovskii, V.L. Utilising fuel more efficiently in reheating and heat treatment furnaces. USSR Scientific and Technical Society for Ferrous Metallurgy, Stal. Vol. 3, pp 274 - 276. BLL Translation M-21957, (1974)
- 6.24 Clarke, B.N. Self-help conservation via effective heat treatment. Metal Progress (US) 108 95 - 96 (1975).
- 6.25 Frick, E.T. Guidelines for energy survival. Metal Progress (US), 108, 62 - 67 (1975)
- 6.26 Roots, D.C. The elimination of atmospheric pollution from coating and drying ovens. Hygrotherm Engineering Ltd. Publication (1975).
- 6.27 Csathy, D. Energy conservation by heat recovery. Paper 749086, 9th Intersoc Energy Conversion Engineering Conf., ASME, San Francisco (1974)
- 6.28 Anon. Benefits of liquid waste incinerators. Processing, p. 41, Feb. 1976.
- 6.29 Rowe, W.G.E. and Huxford, R.C. Waste heat utilisation by 'co-operative' group schemes. Proc. Waste Heat Recovery Conference. Institution of Plant Engineers, London, pp 36 - 42, Sept. 1974.
- 6.30 Anon. The Incineration of Municipal and Industrial waste. Proceedings of Institute of Fuel, Vol. 1 & 2, London (1969)
- 6.31 Hung, W. Results of a firetube test boiler in flue gas with hydrogen chloride and fly ash. Trans. ASME, Proc. Winter Annual Meeting, Paper 75-WA/HT-39, Dec. 1975
- 6.32 Fuchshuber, P. Modern heat supply of an industrial plant. Betriebstechnik, 13, (1972).
- 6.33 Huang, C.J. and Dalton, C. Energy recovery from solid waste. Vol. 1 Summary report; University of Houston, Texas, NASA Report CR-2525, April, 1975.
- 6.34 Thorne, J.G.M. Closed circuit heat transfer systems and fluids, Processing, pp 49 - 52, March 1976.

Глава 7

- 7.1 Dunn, P.D. and Reay, D.A. Heat Pipes. Pergamon Press, Oxford, (1976)
- 7.2 Behrens, C.W. Heat Pipes: Breakthrough in thermal economy? Appliance Manufacturer, pp. 73 - 76, Nov. 1973.
- 7.3 Rogers, B.T. Passive heat recovery as an energy conservation measure. Building Systems Design, Pt. I, Feb. 1972, Pt. II, March 1972.

- 7.4 Vasiliev, L.L. et al. A study of heat and mass transfer in heat pipe based exchangers. II Int. Heat Pipe Conf., Bologna, Italy, (1976)
- 7.5 Basiulis, A. and Plost, M. Waste heat utilisation through the use of heat pipes. Trans. ASME, Paper 75-WA/HT-48, New York, Nov. 1975.
- 7.6 Feldman, K.T. Simplified design of heat pipe heat exchangers. Proc. II Int. Heat Pipe Conf., Bologna, Italy, March/April, 1976.
- 7.7 Amode, J.O. Analysis of a heat pipe heat exchanger. Ph.D. Dissertation, Univ. of New Mexico, Albuquerque, (1975)
- 7.8 Amode, J.O. and Feldman, K.T. Preliminary analysis of heat pipe heat exchangers for heat recovery. Trans. ASME, Paper 75-WA/HT-36, New York, Nov. 1975.
- 7.9 Holmberg, R.B. Heat transfer in liquid-coupled indirect heat exchange systems. Trans. ASME, J. Heat Transfer, Paper 76-HT-E, pp 499 - 503, Nov. 1975.
- 7.10 Fulton, R. Ecoterm - a method of waste heat recovery. Fläkt-SF Air Treatment Ltd., Publicity Literature, (1975).
- 7.11 Strindehag, O. and Astrom, L. Energy conservation by Ecoterm. Fläkt Review, Sweden, (1974)
- 7.12 Strindehag, O. A liquid coupled system for heat recovery from exhaust gases. Building Serv. Eng., 43, 52 - 56, (1975)
- 7.13 Applegate, G. Heating a factory for nothing. Heating & Vent. Eng., 44, 21 - 24, (1970)
- 7.14 Mortimer, J. Exchanging heat to save fuel. The Engineer, pp 34 - 37, 2/9 August, 1973.
- 7.15 Applegate, G. Heat regeneration by thermal wheel. Proc. Waste Heat Recovery Conference, Inst. Plant Engrs., London, 25 - 26 Sept. 1974.
- 7.16 Anon. Waste heat recovery systems. Processing, p. 46, May, 1975.
- 7.17 Fisher, D.R. et al. Performance testing of rotary air-to-air heat exchangers. Trans. ASHRAE, Pt. 1 pp 322 - 332, (1974)
- 7.18 Butler, P. Use the Munter wheel to recover your heat and make big savings. The Engineer, p. 24, 20 Nov. 1975.
- 7.19 Congram, G.E. Plate heat exchangers save fuel, space and downtime. Oil & Gas Journal (US), 22 Sept. 1975.
- 7.20 Anon. Regeneration and the energy crisis. APV Spearhead - Engineering in the Process Industries, No. 3, June 1974.
- 7.21 Starkie, G.L. Some aspects of energy conservation in dairy process plant. J. Soc. Dairy Technology, 28, 121 - 129, (1975)
- 7.22 Bunton, J.F. Recovery of low grade heat. Proc. Inst. Plant Engineers Waste Heat Recovery Conference, London, 25 - 26 Sept. 1974.
- 7.23 Lyall, O. The Efficient Use of Steam, HMSO, London, (1956)
- 7.24 Lock, A.E. Boiler Economics (Part 3) Industrial Process Heating, 12, 32 - 33 (1972)
- 7.25 Wood, B.D. Applications of Thermodynamics. Addison-Wesley, Reading, Mass. (1969)

- 7.26 Panaritis, J.P. and Streich, H.J. Heat recovery in process plants. Chemical Engineering, 80 - 88, (1973)
- 7.27 Anon. Waste heat boilers and their uses in the chemical and metallurgical industries. Schmidt'sche Heissdampf - Gesellschaft GmbH Prospectus, 1969.
- 7.28 Gibson, T. Waste heat boiler possibilities, Proc. Inst. Plant Engineers. Waste Heat Recovery Conference, London, 25 - 26 Sept. 1974.
- 7.29 May, H. Recuperators - their use and abuse. Iron and Steel International, pp 231 - 240, June, 1973.
- 7.30 Anon. Recuperator saves natural gas in heat processing. Instruments and Control Systems (USA), pp 72, 74, Jan. 1976.
- 7.31 Kolbusz, P. Industrial applications of heat pumps. Electricity Council Research Centre, Report ECRC/N845, Sept. 1975.
- 7.32 Macadam, J.A. Heat Pumps - the British experience. Building Research Establishment Note N117/74, Dec. 1974..
- 7.33 Montagnon, P.E. and Ruckley, A.L. The Festival Hall heat pump. J. Institute of Fuel, pp 1 - 17, Jan 1954.
- 7.34 Kolbusz, P. The use of heat pumping in district heating. Electricity Council Research Centre, Report ECRC/N700 Feb. 1974.
- 7.35 Anon. Heat pumps. A new application for Howden screw compressors. Howden Journal, Howden Group Ltd., Glasgow, 14, 33 - 39, (1976)
- 7.36 Ross, P.N. The Templifier for process heat. Proc. EEI Conservation and Energy Management Division Conf., Atlanta, Georgia, March 16 - 18, 1975.
- 7.37 Anon. Westinghouse Templifier. Westinghouse Electric Corporation Bulletin TP, Feb. 1976.
- 7.38 Kolbusz, P. The improvement of drying efficiency. Electricity Council Research Centre, Report ECRC/R476, Jan. 1972
- 7.39 Williams, E. Keep the factory fires burning by extracting heat from cooling fluid. The Engineer, p. 18, 1/8 Jan. 1976.
- 7.40 Baker, M.L. Systems for extracting and utilising engine rejected heat. Trans. ASME, Paper 63-OGP-6, New York, ASME, 1963.
- 7.41 Farrell, T. Thermoelectric heat pumping. Electricity Council Research Centre, Report ECRC/R844, Sept. 1975.
- 7.42 Ellington, R.T. et al. The absorption cooling process. IGT Research Bulletin No. 14, Chicago, (1957)
- 7.43 Wurm, J. An assessment of selected heat pump systems. Annual Report, (Feb. 1973 - Feb. 1974). Institute of Gas Technology, Project HC-4-20, Chicago, March, 1974.

Глава 8

- 8.1 Ramakumar, R. et al. Solar energy conversion and storage systems for the future. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-94, 6, Nov./Dec. 1975.
- 8.2 Ungood, W.P.C. and Sayer, C.E. Waste heat steam for electricity generation. Waste Heat Recovery, Chapman & Hall, London (1963)
- 8.3 Lyle, O. The Efficient Use of Steam. HMSO, London (1956)
- 8.4 Harris, J. The economic value of insulation. Maintenance Engineering April 1975.
- 8.5 Anon. Energy saving: the fuel industries and some large firms, Energy Paper No. 5, Department of Energy, HMSO, London, (1975)
- 8.6 Anon. Ball blanket prevents boiler corrosion. The Heating and Ventilating Engineer, Nov. 1968.
- 8.7 Gillies, J. Heat storage and waste heat recovery. The Plant Engineer, 14, 257 - 262, (1970)
- 8.8 Gardner, G.C. et al. Storing electrical energy on a large scale. CEGB Research, 2, 12 - 20 (1975)
- 8.9 Gibbs, M.G. et al. Thermal storage for industrial process heating. Report ERC/M504, Electricity Council Research Centre, Capenhurst, Sept. 1972.
- 8.10 Altman, M. Conservation and better utilisation of electric power by means of thermal energy storage and solar heating. National Science Foundation, University of Pennsylvania, Report UPTES-71-1, Oct. 1971.
- 8.11 Lorsch, H.G. Thermal energy storage devices suitable for solar heating. 9th Intersoc Energy Conversion Engineering Conf. (1974)
- 8.12 Van Vechten, J.A. Latent heat energy storage is feasible. Electrical World. Aug. 15, 1974.

Д. РЕИ

ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Редактор издательства Э. К. Биленько
Художественный редактор А. Т. Кирьянов
Технический редактор Л. В. Порхачева
Корректор З. Б. Драновская
ИБ № 156

Сдано в набор 27.05.83. Подписано в печать 20.07.83
Формат 60x90^{1/4} Бумага типографская № 1 Гарнитура литературная
Печать высокая. Усл. печ. л. 13,0 Усл. кр.-отт 13,0 Уч.-изд. л. 15,14
Тираж 12 000 экз. Заказ № 1641 Цена 1 р. 40 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 4 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
129041, Москва, Б. Переяславская ул., д. 46.